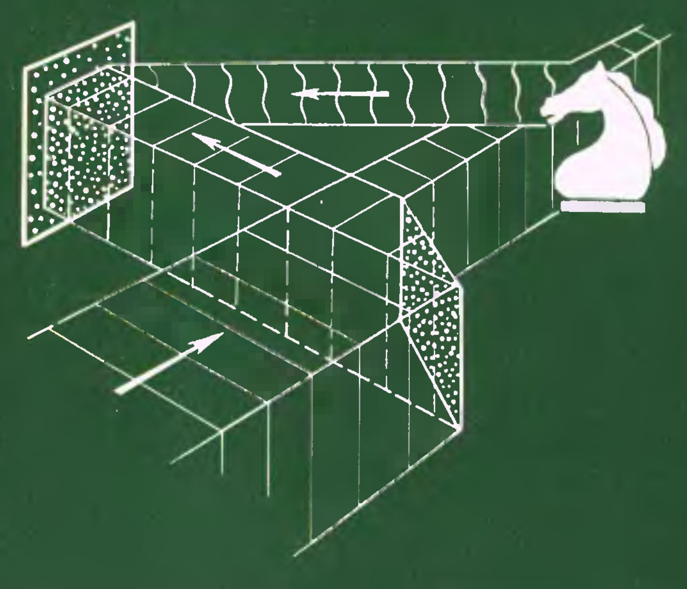
A. Kitaïgorodski

la physique à la portée de tous

livre 4

science pour tous



éditions mir·moscou

A. KITAÏGORODSKI

La physique à la portée de tous

LIVRE 4

Photons et noyaux



ÉDITIONS MIR · MOSCOU

Traduit du russe
par *S. Medvédev*

На французском языке

AVANT-PROPOS

Ce quatrième livre termine la série de « Physique pour tous » consacrée à l'étude des fondements de la physique.

Il faudrait s'entendre d'abord sur le sens du mot « fondements ».

Ce mot désigne avant tout les lois fondamentales sur lesquelles repose tout l'édifice de la Physique. Ces lois fondamentales étant peu nombreuses, on peut les énumérer: lois de mouvement de la mécanique classique; lois de la thermodynamique; lois qu'expriment les équations de Maxwell et qui régissent le comportement des charges, des courants et des champs électromagnétiques; lois de la mécanique quantique et théorie de la relativité.

Comme toutes les autres lois des sciences de la Nature, les lois de la Physique sont des lois empiriques fondées sur l'observation et l'expérience. Les études expérimentales fournissent une multitude de résultats primaires tels que la structure atomique et moléculaire des substances, le modèle nucléaire de l'atome, la dualité onde-corpuscule, etc. Le nombre de lois fondamentales, de résultats factuels essentiels et de concepts nécessaires à leur description n'est pas très grand.

Au cours des dernières décennies, la Physique a connu un tel essor que les personnes exerçant leurs activités dans différents domaines de la Physique ne s'entendent plus dès qu'elles abordent des questions spéciales se trouvant en dehors du cadre des lois et des concepts formant les fondements de tous les domaines de la physique. Certaines parties de la physique se sont amalgamées à la technique, à d'autres sciences de la Nature, à la médecine et même aux sciences humaines et constituent aujourd'hui des disciplines indépendantes.

Nul ne saurait disconvenir qu'une étude des lois fondamentales et des principaux résultats expérimentaux doit

précéder celle des applications de la physique. Il est tout aussi indubitable que chaque auteur choisira et arrangera à son goût et suivant ses intérêts scientifiques les composantes nécessaires à l'édification des fondements de la Physique.

L'auteur présente aux lecteurs sa propre variante de l'exposé des fondements de la physique.

Dans l'avant-propos aux premiers livres de « Physique pour tous », nous avons déjà précisé à quel genre de lecteur s'adressait cet ouvrage. Il s'adresse à tous ceux qui voudraient se remémorer la Physique, se faire une idée de ce qu'elle est devenue de nos jours, de l'influence qu'elle exerce sur le progrès scientifique et technique et de la contribution qu'elle apporte à la formation d'une conception matérialiste de l'Univers. Nous espérons que certaines pages éveilleront l'intérêt des enseignants de physique et des lycéens que cette science attire. Les lecteurs que les formules mathématiques rebutent trouveront ici de quoi satisfaire leur curiosité.

Il va de soi que « Physique pour tous » n'a pas la prétention de servir de manuel de Physique.

Le livre « Photons et noyaux » a pour objet d'illustrer la mise en œuvre des lois du champ électromagnétique et de la physique quantique pour une étude du comportement des ondes électromagnétiques de différentes longueurs d'onde.

Une initiation préalable à la mécanique ondulatoire et à la théorie de la relativité restreinte permettra d'aborder la question du noyau atomique. A la suite d'un exposé des principaux résultats concernant la structure du noyau atomique, on s'attachera à une discussion de la question cruciale des sources d'énergie dont pourrait disposer l'Humanité. Un aperçu sur la physique de l'Univers termine cet ouvrage.

Le volume restreint de l'ouvrage nous a obligés à sacrifier certains thèmes traditionnels, afin de ménager la place pour un exposé de nouveaux développements.

Alexandre Kitaïgorodski

CHAPITRE PREMIER

RAYONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE MOU

ÉCHANGE D'ÉNERGIE PAR RAYONNEMENT

Nous appelons rayonnements électromagnétiques mous les rayonnements dont les longueurs d'onde sont comprises entre 0,1 et 100 μm. Il s'agira en l'occurrence d'ondes électromagnétiques produites par des procédés autres que ceux de la radiotechnique. Nous avons tenu à préciser ce point, car les procédés de la radiotechnique permettent de produire des radiations de longueurs d'onde comprises dans l'intervalle ci-dessus.

Bien souvent on désigne les rayonnements mous sous le nom de rayonnements lumineux. Il ne faut pas oublier que les radiations visibles ne couvrent qu'une gamme étroite de longueurs d'onde, s'étendant, pour un œil humain « moyen », de 380 à 780 nm (0,38 à 0,78 μm).

Lorsque nous parlerons, dans ce qui suit, de lumière, nous utiliserons ce terme dans un sens large, entendant par là que les lois qui régissent la lumière visible s'appliquent également à toutes les autres radiations faisant partie des rayonnements mous.

Les radiations de longueurs d'onde plus courtes que celles des radiations visibles forment les rayonnements ultraviolets et les radiations dont la longueur d'onde est plus grande que celle de la lumière visible sont appelées radiations infrarouges.

Nous pouvons aborder maintenant le sujet de ce paragraphe.

On connaît trois modes d'échange de chaleur correspondant à trois phénomènes physiques différents: conduction thermique, convection thermique et rayonnement thermique. Pour faire l'étude des échanges d'énergie par rayonnement, il faut se livrer à l'observation du comportement des corps se trouvant dans le vide (afin d'exclure les échanges d'énergie par convection) à une certaine distance les uns des autres (afin d'exclure les effets de la conduction thermique).

L'expérience montre que si deux ou plusieurs corps forment un système fermé (rappelons que cela signifie qu'il n'y a pas d'échange d'énergie avec des objets ne faisant pas partie du système) leurs températures s'égalisent. Chaque corps du système se comporte simultanément comme un émetteur et un récepteur de radiations; tous ces corps sont le siège d'innombrables actes de transition des atomes et des molécules d'un niveau d'énergie supérieur sur un niveau inférieur (avec émission d'un photon) et de transitions inverses des niveaux inférieurs sur des niveaux supérieurs (avec absorption d'un photon). A cet échange d'énergie participent des photons de toutes les énergies, ou ce qui revient au même, des ondes électromagnétiques de toutes les longueurs d'onde.

Il est évident que les corps n'absorbent pas la totalité de l'énergie incidente. Il existe des corps qui la dissipent ou se laissent traverser de préférence par des radiations de certaines longueurs d'onde. Néanmoins l'équilibre thermique finit toujours par s'établir dans tous les corps.

La condition de l'équilibre thermique impose que pour chaque longueur d'onde le rapport de l'énergie de l'onde absorbée à l'énergie de l'onde émise soit le même pour tous les corps. Une démonstration rigoureuse de ce théorème fut faite en 1860 par le physicien allemand Gustav Kirch-

hoff (1824-1887). La valeur de ce rapport peut varier en fonction de la température, mais si la température est donnée, ce rapport sera constant pour des photons d'une certaine énergie.

Ce théorème est presque évident et ne nécessite pas de démonstration puisqu'il affirme qu'à l'équilibre thermique le nombre de photons absorbés d'une énergie donnée est égal au nombre de photons émis de même énergie.

On en déduit la règle suivante : un objet qui absorbe fortement certaines radiations, les émet aussi intensément.

Cette règle aide à prévoir les conditions d'établissement de l'équilibre thermique. Pourquoi de l'eau contenue dans un flacon à parois argentées sera-t-elle faiblement échauffée par les rayons solaires, mais sera-t-elle fortement échauffée si on la place dans un flacon en verre noir ? L'explication en est toute simple : les corps de couleur noire absorbent fortement les rayons incidents dont l'énergie servira à élever la température de ces corps ; l'équilibre thermique s'établira après que les corps se seront fortement échauffés. Les surfaces argentées se comportent, elles, comme d'excellents réflecteurs ; comme l'objet n'absorbera que peu d'énergie et qu'il ne s'échauffera que peu et lentement, l'équilibre thermique s'établira à une température peu élevée.

Inversons l'expérience : versons de l'eau chaude dans les deux flacons et plaçons-les dans un réfrigérateur. Dans quel flacon le refroidissement de l'eau sera-t-il plus rapide ? Si l'échauffement est rapide, le refroidissement le sera aussi, et plus la quantité d'énergie absorbée est grande, plus la quantité d'énergie rayonnée sera grande.

Les expériences avec des céramiques colorées sont fort spectaculaires. Un objet de couleur verte

est un objet qui absorbe toutes les couleurs sauf le vert. Cela tient à ce que l'œil perçoit les rayons lumineux qui sont réfléchis ou diffusés par les substances. Portons à l'incandescence un fragment de céramique. Quelle sera sa couleur ? Vous avez la réponse sur le bout de la langue, il sera violet ; violet, en effet, puisque c'est la couleur complémentaire du jaune-vert. Deux couleurs sont dites complémentaires l'une de l'autre si leur mélange donne le blanc.

Le terme « couleurs complémentaires » fut déjà introduit dans la science par Newton qui a décomposé, à l'aide d'un prisme de verre, la lumière blanche en spectre.

RAYONNEMENT DES CORPS INCANDESCENTS

Il est d'expérience courante que lorsqu'on chauffe un morceau de métal, celui-ci rougit d'abord, puis passe au blanc. On n'arrive pas à rendre incandescentes des substances chimiques, car elles fondent ou se décomposent avant. Tout ce qui suit s'applique donc surtout aux métaux.

Le résultat le plus remarquable de toutes ces études est que les spectres de rayonnement des différents corps incandescents ne présentent guère de particularités. Conformément à la loi fondamentale des niveaux d'énergie, les spectres d'émission et d'absorption doivent coïncider. Comme les métaux ne sont pas transparents dans tout le spectre des rayonnements mous, ils doivent émettre des photons de toutes les énergies.

On peut énoncer cette dernière proposition de façon différente : l'apparition d'un spectre continu résulte de ce que dans un système formé d'un grand nombre d'atomes les niveaux d'énergie des différents atomes se réunissent en bandes d'énergie qui se recouvrent mutuellement. Dans

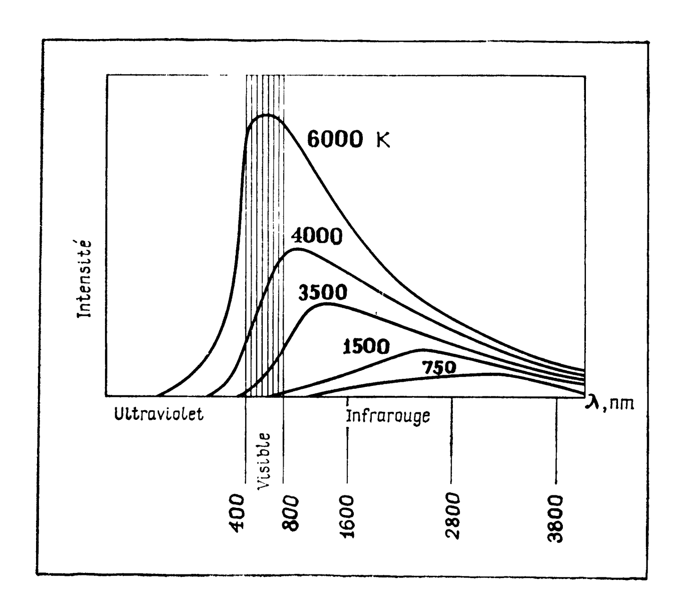


Fig. 1.1

ces systèmes n'importe quelles transitions entre les niveaux d'énergie sont possibles; comme n'importe quelles différences d'énergie entre le m-ième et le n-ième niveau sont réalisables, le système peut émettre et absorber des radiations de toutes les fréquences. La figure 1.1 illustre l'allure des spectres d'un corps incandescent correspondant à différentes températures (on a représenté les courbes théoriques correspondant au corps noir).

On doit noter que le calcul théorique de la forme de ces courbes, effectué en 1900 par M. Planck, fut le premier acte qui marqua la naissance de la physique quantique. Pour arriver à un accord entre théorie et expérience, Planck



MAX PLANCK (1858-1947). Eminent physicien allemand, créateur de la théorie des quanta. Cherchant à établir l'expression mathématique qui décrirait correctement la distribution spectrale du rayonnement du corps noir, Planck montra que cette formule pouvait être obtenue en introduisant dans la théorie le « quantum d'action ». Planck admit qu'un corps émet de l'énergie par portions égales au produit de la constante (qui a reçu ultérieurement son nom) par la fréquence de la lumière.

fut conduit à admettre que l'émission et l'absorption de la lumière se font par portions définies. Néanmoins, Planck n'osa pas faire le pas suivant et invoquer des grains de lumière qu'on appelle maintenant photons. C'est Einstein qui le fit en 1905.

Ce n'est qu'en 1913 que Bohr introduisit la notion de quantification de l'énergie. Une théorie logique et conséquente du rayonnement d'origine thermique n'apparut qu'en 1926.

Avant de parler théorie, examinons la forme des courbes représentées sur la figure 1.1. Notons avant tout que l'aire comprise entre la courbe et l'axe des abscisses augmente rapidement lorsque la température s'élève. Quel sens physique faut-il attribuer à l'aire délimitée par la courbe d'émission ? Pour construire les courbes on porte en ordonnées l'intensité de rayonnement correspondant à une longueur d'onde déterminée. Que faut-il entendre par « longueur d'onde déterminée » ? Faut-il la caractériser par le nombre 453 nm ou par 453,2 nm, ou par 453,257859987654 nm ? Le lecteur conçoit fort bien qu'il s'agit ici d'un petit intervalle de longueurs d'onde, par exemple d'un intervalle égal à 0,01 nm. Il s'ensuit que ce n'est pas à l'ordonnée qu'on attribue un sens physique, mais à un petit rectangle de 0,01 nm de base. L'aire de ce rectangle représente l'énergie transportée par les ondes de longueurs d'onde comprises entre 453,25 et 453,26 nm, par exemple. En divisant en petits rectangles toute l'aire délimitée par la courbe et en sommant les aires de ces rectangles, on obtient l'intensité intégrale de tout le spectre. Cet exemple sert d'illustration à l'opération que les mathématiciens appellent intégration. Ainsi l'aire comprise entre la courbe et l'axe des abscisses représente l'intensité de rayonnement intégrale.

On a constaté qu'elle est proportionnelle à la quatrième puissance de la température.

La figure qui fait l'objet de notre discussion montre qu'une élévation de la température entraîne non seulement une croissance de l'aire délimitée par les courbes, mais encore un déplacement des maximums des courbes dans le sens de l'ultraviolet.

La longueur d'onde en micromètres correspondant au maximum de rayonnement (ou d'absorption) est liée à la température donnée en kelvins par la relation

$$\lambda_{max} = \frac{2886}{T}.$$

A basse température le maximum se situe dans l'infrarouge et c'est pour cela que l'on appelle parfois le rayonnement infrarouge rayonnement thermique. Il est remarquable qu'il existe des dispositifs pouvant détecter le rayonnement thermique émis par des corps ayant la température ordinaire ou même une température encore plus basse. La technique moderne permet de « voir » dans l'obscurité complète. Certains animaux jouissent de cette faculté et cela ne doit pas nous étonner puisque les rayons infrarouges possèdent, en principe, les mêmes propriétés que la lumière visible.

On ne doit pas oublier non plus que tout animal est une source de rayonnement. On parle souvent de personnes capables de « sentir » la présence d'autres personnes dans l'obscurité la plus complète. Il n'y a là aucun mystère puisqu'il existe des gens doués d'une sensibilité aiguë aux rayons de chaleur.

Je pense qu'il serait opportun de raconter une histoire vécue qui témoigne de ce qu'il faut tenir compte de rayonnements thermiques émis par des

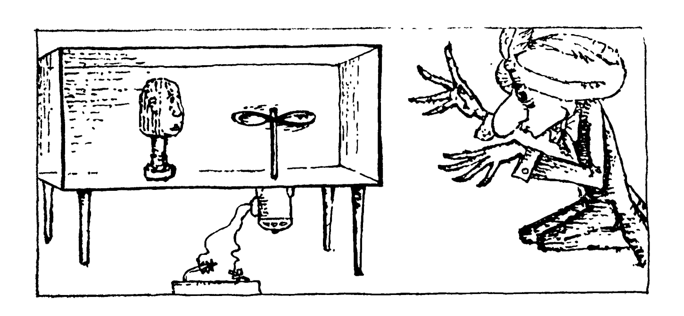


Fig. 1.2

sources qui, dans le sens commun du mot, sont des corps non chauffés. Il y a quelques années on me demanda de trouver une explication aux expériences que réalisait un homme qui se faisait passer pour « mage »: il arrêtait un moteur par un effort de sa volonté. Je devais trouver une explication rationnelle à ces expériences (les magiciens modernes qui se plaisent à user d'une terminologie pseudoscientifique parlent dans ce cas de télékinésie).

Le schéma de l'expérience est illustré par la figure 1.2 ; les ailettes fixées sur l'axe du moteur arrêtaient de tourner lorsque le mage s'asseyait à côté de la boîte à l'intérieur de laquelle pénétrait l'axe du moteur portant les ailettes. Je me suis bien vite rendu compte que n'importe quelle personne qui s'installait à côté de la boîte faisait arrêter le mouvement des ailettes au bout de 10 à 15 minutes. Ce n'est pas le moteur qui arrêtait de tourner, comme le prétendait le mage, mais les ailettes. Dès ce moment on pouvait affirmer qu'une certaine force déterminée par la présence de l'homme contrecarrait la force d'adhérence entre l'axe du moteur et les ailettes.

En approchant de la boîte une lampe électrique branchée sur le réseau, on pouvait arrêter la rotation des ailettes presque instantanément. Ainsi il s'agissait de la chaleur rayonnée par le corps humain. Après avoir insufflé dans la boîte de la fumée de tabac, je constatais que, à l'intérieur de la boîte, apparaissaient des courants de convection dirigés dans le sens requis pour s'opposer à la rotation des ailettes. Des mesures précises ont montré que près de la paroi la plus proche de l'homme la température était de 1° environ plus élevée que près de la paroi opposée.

On décèle facilement les rayons infrarouges émis par un corps chauffé à 60-70 °C en y approchant les mains. Naturellement, il faut éliminer au préalable l'influence des courants de convection; comme l'air chaud monte, il faut approcher la main au-dessous de l'objet. Dans ces conditions on peut être certain qu'on ressent l'action des rayons thermiques.

Avant de quitter la question des rayons thermiques, il est utile d'expliquer pourquoi le remplacement des filaments de charbon des lampes d'éclairage par des filaments de tungstène augmente grandement l'efficacité de l'éclairage. On ne peut chauffer un filament de charbon qu'à 2100 K, tandis qu'un filament de tungstène peut être porté à 2500 K. Pourquoi donc cette différence de 400 degrés est-elle si importante? Les lampes à incandescence servent à l'éclairage et non au chauffage; par conséquent on doit s'efforcer de déplacer le maximum de la courbe spectrale d'énergie dans la gamme des radiations visibles. Les courbes représentées sur la figure 1.1 montrent qu'on réaliserait le rendement maximal si on disposait d'un filament qui pourrait être chauffé à 6000 K, i.e. la température qui règne à

la surface du Soleil. Mais même si on passe de 2100 K à 2500 K, la partie de l'énergie transformée en rayonnement visible passe de 0,5 à 1,6 %.

THÉORIE DU RAYONNEMENT THERMIQUE

Si les corps émetteurs et les corps absorbants forment un système fermé, le « gaz » de photons qui assure l'échange d'énergie entre les corps doit être en équilibre avec les atomes qui créent ces photons. Le nombre de photons d'énergie $h\nu$ est fonction du nombre d'atomes occupant le niveau E_1 et du nombre d'atomes occupant le niveau E_2. A l'équilibre ces nombres restent constants.

L'équilibre présente un caractère dynamique puisque les processus d'excitation et d'émission ont lieu simultanément. Que ce soit à la suite d'un choc avec une autre particule ou à la suite de l'absorption d'un photon venu de l'extérieur, un atome ou un système d'atomes viennent occuper un niveau de plus haute énergie. Dans cet état excité le système peut subsister pendant un certain temps (de l'ordre de fractions de seconde), puis il retourne sur un niveau d'énergie plus petite. Ce processus constitue l'émission spontanée. L'atome se comporte à la manière d'une bille qui se maintient à grand-peine sur un pic d'un système de sommets de profil compliqué ; à la moindre poussée, l'équilibre est rompu et la bille roule dans un creux qui est généralement le creux le plus profond d'où on ne pourra la faire sortir qu'au moyen d'un choc énergique. Un atome qui est venu s'installer sur le niveau d'énergie la plus basse, se trouve dans un état stable.

Notons qu'une bille peut occuper entre les positions « sur le pic » ou « dans un creux profond » un creux peu profond d'où on peut la faire sortir d'une chiquenaude. On dit alors que la bille

occupe une position métastable. Il existe donc, en plus des états excités et stables, encore des états métastables.

Les transitions peuvent se produire dans les deux sens. Différents atomes viendront occuper à tour de rôle les niveaux d'énergie supérieurs. Au bout d'un temps court ils retourneront sur un niveau d'énergie plus petite en émettant de la lumière. Simultanément, d'autres atomes qui auront reçu de l'énergie passeront sur les niveaux supérieurs.

La loi de la conservation de l'énergie impose que le nombre de transitions allant dans un sens soit égal au nombre de transitions allant dans le sens opposé. De quoi dépend le nombre de transitions vers les niveaux supérieurs? Ce nombre dépend de deux facteurs: premièrement, du nombre d'atomes occupant le niveau inférieur et, deuxièmement, du nombre de chocs qui les feront passer sur un niveau supérieur. Quant au nombre de transitions vers les niveaux inférieurs, il devrait dépendre uniquement du nombre d'atomes se trouvant sur les niveaux supérieurs. C'est ce qu'affirmaient initialement les physiciens théoriciens, mais l'accord entre théorie et expérience était mauvais. Le nombre de transitions vers le haut qui dépendait de deux facteurs augmentait avec la température beaucoup plus rapidement que le nombre de transitions inverses qui ne dépendait que d'un seul facteur. Le modèle qui était l'évidence même conduisait à un résultat absurde: à un moment donné tous les atomes devraient venir occuper le niveau supérieur, le système d'atomes se trouverait dans un état instable et aucun rayonnement ne serait émis.

C'est à cette conclusion dénuée de sens qu'arriva Einstein en 1926 en analysant les travaux de ses prédécesseurs et il en conclut qu'un fac-

teur inconnu affectait les transitions des atomes des niveaux supérieurs sur les niveaux inférieurs. Il fallait admettre qu'en plus des transitions spontanées sur les niveaux inférieurs, il y avait des transitions induites.

Qu'est-ce que le rayonnement induit ? Posons que le système occupe le niveau supérieur qui se trouve séparé du niveau inférieur par une différence d'énergie $E_2 - E_1 = h\nu$. Or on démontre que si un photon d'énergie $h\nu$ tombe sur le système, celui-ci passe sur le niveau inférieur. Le photon, lui, n'est pas absorbé par le système et poursuivra son chemin suivant la même direction en compagnie d'un nouveau photon de même énergie auquel il aura donné naissance.

Il ne faut pas chercher la logique de ce raisonnement qui est le fruit d'une inspiration subite, d'une intuition. C'est l'expérience qui, seule, peut attester de sa justesse. Avec l'hypothèse de l'existence de rayonnements induits (ou stimulés) on arrive à établir une formule quantitative qui se traduit par une courbe de rayonnement en fonction de la longueur d'onde pour les corps incandescents. Les résultats théoriques sont en excellent accord avec les résultats expérimentaux et c'est ce qui justifie l'hypothèse avancée.

Notons qu'on n'a tiré des conclusions d'intérêt pratique (découverte du laser) de l'existence du rayonnement stimulé que longtemps après qu'Einstein introduisît cette notion.

LES SPECTRES OPTIQUES

On peut dire d'une façon générale que tout corps est source d'un rayonnement électromagnétique mou. A l'aide d'un spectrographe, appareil optique fondé sur l'utilisation d'un prisme ou d'un réseau de diffraction, on arrive à analyser

la lumière, i.e. en former le spectre. Le spectre peut être continu, à bandes ou à raies. Les spectres de tous les corps solides incandescents sont peu différents les uns des autres ; remarquons qu'on ne peut porter à incandescence qu'un petit nombre de substances. Rares sont les liquides incandescents. Les spectres d'émission des gaz fournissent beaucoup d'informations. C'est le cas des spectres que fournissent les rayons émis par les étoiles. Les données les plus importantes sur la structure de l'Univers sont apportées sur la Terre par les rayons lumineux émis par la substance stellaire se trouvant à l'état gazeux.

Sur Terre on produit aisément les spectres d'émission des atomes. Pour que les atomes émettent de la lumière, on fait passer un courant électrique à travers le gaz ou bien on porte le gaz à haute température. Ces procédés ne permettent de produire que les spectres atomiques, à l'exclusion de spectres moléculaires, car les molécules sont dissociées en atomes avant que le gaz devienne lumineux. C'est pour cela que chaque fois qu'il s'agit de corps solides ou liquides, on étudie leurs spectres d'absorption. Les renseignements que l'on cherche à obtenir dépendent, en dernier ressort, du système de niveaux d'énergie et on obtient la même information, quel que soit le sens des transitions (de haut en bas ou de bas en haut); on utilisera la méthode la plus commode.

Seuls les gaz et les solutions diluées permettent d'obtenir des spectres de raies formés de lignes fines nettement distinctes. Nous avons mentionné dans le deuxième livre que les molécules dissoutes se comportaient, à de nombreux points de vue, comme les molécules d'un gaz. Cette conclusion s'applique parfaitement à la spectroscopie optique. Malheureusement le solvant exerce son influence sur la composition du spectre ;

pour pouvoir en tenir compte, on compare les spectres des molécules dissoutes dans des solvants différents et on en déduit la composition du spectre vrai des molécules à l'étude.

Le fait de relever un spectre caractéristique ne suffit pas pour déterminer la structure du système des niveaux d'énergie de la molécule. Or ce n'est pas nécessaire dans de nombreux cas pratiques. Si on dispose de catalogues où sont répertoriées les raies spectrales et leurs intensités ou bien les courbes de variation de l'intensité en fonction de la fréquence des différentes familles de substances chimiques, on pourra comparer le spectre d'une substance inconnue aux spectres répertoriés et l'identifier, un peu comme le fait le criminaliste en identifiant les empreintes digitales.

Depuis quelque temps l'analyse spectrale optique est concurrencée par les méthodes de la radiospectroscopie. La sensibilité de ces dernières est encore inférieure à celle des méthodes optiques, mais leurs possibilités d'analyse quantitative et qualitative des mélanges sont de loin meilleures que celles des méthodes optiques.

Nous n'avons pas besoin d'apprendre à connaître les spectres de substances concrètes, car il est bien suffisant de connaître le schéma des niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène et le schéma de principe des niveaux d'énergie d'une molécule d'hydrogène libre.

Le système des niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène est représenté sur la figure 1.3. On notera qu'à mesure qu'on s'éloigne du zéro de l'échelle des énergies, les raies se ressèrent de plus en plus.

Le zéro de l'échelle ne correspond nullement à une énergie nulle puisqu'un atome non excité possède une énergie déterminée. Mais comme dans

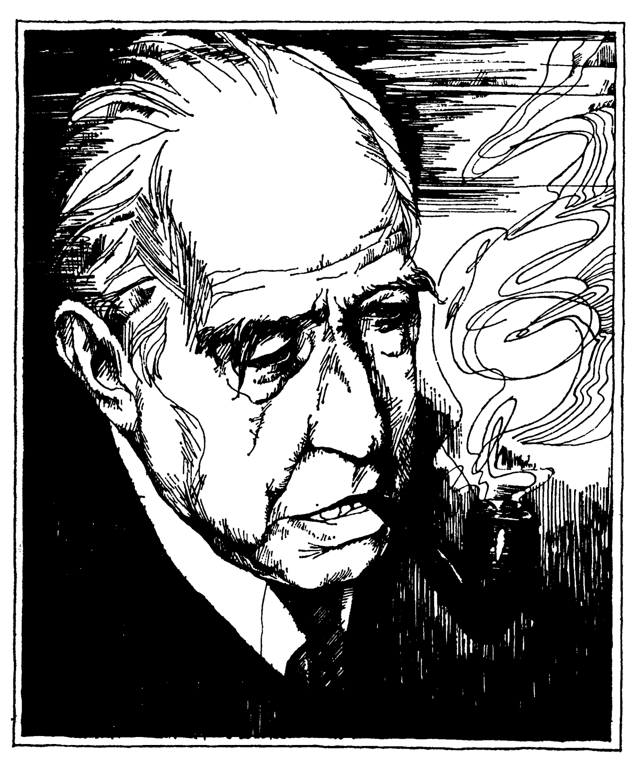
Fig. 1.3

les spectres ne se manifestent que les différences d'énergie, il est commode de prendre la valeur nulle pour origine de l'échelle. Suivant l'intensité du « choc » que subit l'atome, il pourra atteindre n'importe quel « étage », séjourner un temps court dans cet état métastable et redescendre suivant l'un des deux mécanismes: rayonnement spontané ou stimulé.

Il est commode de diviser le spectre obtenu en séries. Chacune des séries est caractérisée par son niveau le plus bas. Dans la partie visible du spectre se trouve la série de Balmer. L'interprétation de cette série fut le premier triomphe de la théorie de la structure de l'atome d'hydrogène de Niels Bohr.

Les probabilités des différentes transitions ne sont pas égales. Plus la probabilité d'une transition est grande, plus l'intensité de la raie correspondante est grande. Il existe aussi des transitions interdites.

Ce fut un grand triomphe lorsque les physiciens théoriciens réussirent à interpréter en dé-



NIELS BOHR (1885-1962). Célèbre physicien danois. Il créa le premier modèle quantique de l'atome et découvrit ainsi la loi de quantification de l'énergie. Il participait activement à l'élaboration des principes de la mécanique quantique. Bohr montra que les notions qui conviennent pour la description du comportement des corps macroscopiques sont inapplicables en principe au micromonde. Il apporta une grande contribution à la théorie sur la structure du noyau atomique.

tail le spectre des atomes d'hydrogène en se fondant sur une solution de l'équation de mécanique quantique établie par Erwin Schrödinger, en 1926.

Les champs extérieurs affectent les spectres des atomes ; les raies éclatent en plusieurs composantes sous l'action du champ électrique (effet Stark) et du champ magnétique (effet Zeeman). Quoique ce soient des phénomènes intéressants, nous nous contenterons d'indiquer qu'on ne réussit à les expliquer qu'après que Goudsmit et Uhlenbeck suggérèrent que l'électron possédait un spin. Nous avons déjà expliqué dans le livre 3 comment se manifeste le spin dans les expériences.

Une dernière remarque concernant le schéma des niveaux d'énergie. Nous voyons que la limite supérieure du schéma est repérée par le nombre 13,53. Ce nombre est la tension d'ionisation. En multipliant la charge de l'électron par la valeur en volts de cette tension, on trouve la valeur du travail qui doit être dépensé pour arracher un électron du noyau, autrement dit pour décomposer l'atome d'hydrogène.

Les spectres atomiques résultent de transitions électroniques. Dès qu'on passe des atomes aux molécules, il devient nécessaire de tenir compte de deux nouvelles composantes de l'énergie. La molécule peut être animée d'un mouvement de rotation et les atomes qui la composent peuvent exécuter des vibrations les uns par rapport aux autres. Ces types d'énergie sont également quantifiés, i.e. ne peuvent avoir que des valeurs discrètes, bien déterminées. L'état énergétique d'une molécule dépend de l'état de son nuage électronique (niveau électronique), de son état vibratoire (niveau vibratoire) et de son état de rotation (niveau rotatoire). On est obligé

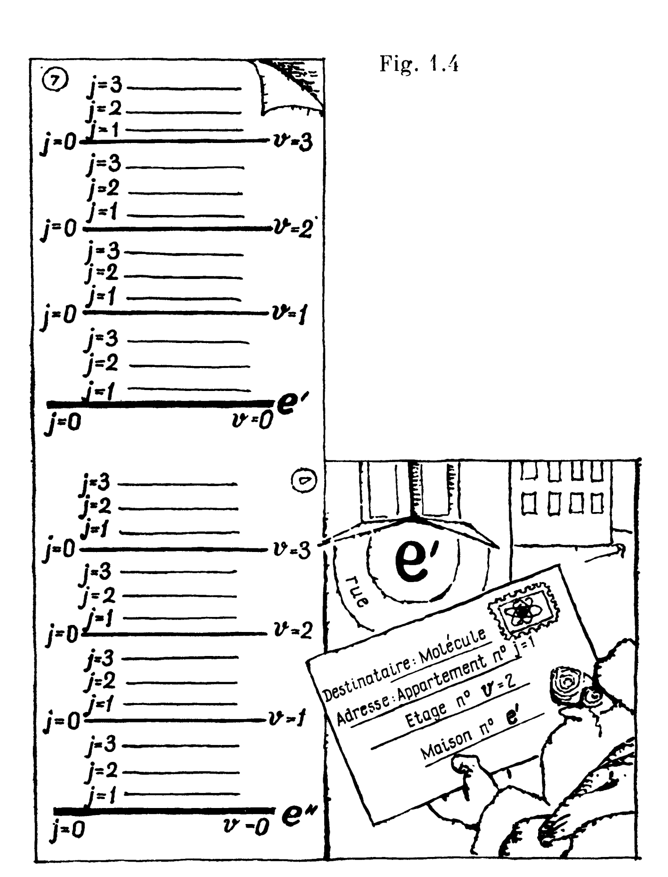


Fig. 1.4

d'avoir affaire à trois types de données (numéro de la maison, numéro de l'étage et numéro de l'appartement).

Voyons ce qui joue le rôle d'étage et ce qui joue le rôle d'appartement. Quels sont les niveaux d'énergie qui sont séparés par de grands intervalles et quels sont ceux qui sont séparés par de petits intervalles? La figure 1.4 apporte une réponse à ces questions. On trouve sur le schéma

deux niveaux électroniques e' et e'' (numéros des maisons). Les étages sont les niveaux vibratoires et sont désignés par la lettre v, et les numéros des appartements, qui correspondent aux niveaux rotatoires, sont désignés par la lettre j. On sait que les maisons ne sont pas indexées ainsi et les appartements sont numérotés par la suite des nombres dans toute la maison. Ici pour décrire les spectres des molécules, on numérotera les appartements à partir de zéro étage par étage. Les intervalles entre les niveaux rotatoires sont donc les plus petits et les intervalles entre les niveaux électroniques (e' et e'') sont les plus grands.

Posons que dans l'échelle des énergies les niveaux électroniques d'une molécule correspondent à 100, 200, 300 unités, les niveaux vibratoires se situent à 10, 20, 30 unités et enfin les niveaux rotatoires se situent à 1, 2, 3, . . . unités. Une molécule qui occuperait le deuxième niveau électronique, le premier niveau vibratoire et le troisième niveau rotatoire aurait une énergie de 213 unités.

Ainsi l'énergie d'une molécule peut être représentée sous la forme

$$E = E_{\text{él}} + E_{\text{vib}} + E_{\text{rot}}.$$

La fréquence de la lumière émise ou absorbée correspondra toujours à la différence (symbole Δ) de deux niveaux, i.e.

$$\nu = \frac{1}{h}(\Delta E_{\text{él}} + \Delta E_{\text{vib}} + \Delta E_{\text{rot}}).$$

Il serait intéressant de pouvoir repérer les transitions qui ne seraient liées qu'à la variation d'une seule de ces énergies. En pratique, on ne peut le faire que pour les transitions rotatoires et ce pour les raisons suivantes.

Commençons l'étude de l'absorption des ondes électromagnétiques par un groupe de molécules, par les ondes longues, ce qui revient à commencer par de petites portions d'énergie $h\nu$. Tant que l'énergie du quantum d'énergie ne deviendra égale à l'intervalle séparant deux niveaux voisins, la molécule n'absorbera aucune énergie. En augmentant progressivement la fréquence, on arrive aux quanta susceptibles de faire passer la molécule sur un niveau rotatoire de plus grande énergie. L'expérience montre que cela se produit dans la gamme des ondes radioélectriques micrométriques (limite supérieure des fréquences radio) ou, ce qui revient au même, dans l'infrarouge lointain. Les molécules absorbent les ondes de 0,1 à 1 mm de longueur d'onde et on obtient un spectre purement rotatoire.

On n'observera de nouveaux phénomènes que lorsque la substance sera irradiée par des radiations dont les quanta d'énergie sont suffisants pour faire passer les molécules sur un nouveau niveau vibratoire de plus grande énergie. Mais nous ne pourrons jamais obtenir un spectre purement vibratoire, i. e. une série où le numéro du niveau rotatoire resterait invariable. Toute transition entre les niveaux vibratoires affectera nécessairement différents niveaux rotatoires. Par exemple, le passage du niveau vibratoire le plus bas (numéro zéro) sur le niveau vibratoire adjacent (numéro un) peut donner lieu aux transitions entre différents niveaux rotatoires; on obtient un spectre de vibration-rotation. Ces spectres se laissent observer dans l'infrarouge (longueur d'onde égale à 3-50 μm). Les transitions entre les différents niveaux vibratoires correspondent à des énergies peu différents et produisent un groupe de raies fines très serrées. Si le pouvoir séparateur du spectroscope est faible, ces raies forment une

bande. Chaque bande correspond à une transition vibratoire bien déterminée.

Nous arrivons maintenant dans une nouvelle région spectrale — la région des radiations visibles ; ici l'énergie des quanta est déjà suffisante pour faire passer la molécule d'un niveau électronique sur un autre. On ne peut réaliser ici des transitions purement électroniques, car elles s'accompagnent nécessairement de transitions vibratoires et rotatoires ; autrement dit, l'« adresse » de la molécule change complètement. Comme toute transition vibratoire-rotatoire se présente sous forme de bande, le spectre d'absorption des radiations visibles sera pratiquement continu.

Pendant longtemps les spectres caractéristiques des atomes et des molécules ne jouaient qu'un rôle auxiliaire dans les déterminations de la structure et de la composition des substances. Depuis peu la spectroscopie fut le théâtre d'événements spectaculaires.

LE RAYONNEMENT LASER

Les trois premières décennies du XXe siècle ont été marquées par d'extraordinaires succès de la physique théorique. C'est au cours de cette période que furent découvertes d'importantes lois de la Nature : les lois de la mécanique des très grandes vitesses, les lois de la structure du noyau atomique, les lois de la mécanique quantique. Les quatre décennies suivantes sont marquées par des réalisations tout aussi sensationnelles concernant les applications pratiques de la théorie. L'Humanité apprit à extraire de l'énergie des noyaux atomiques, élabora les dispositifs à semiconducteurs qui ont transformé radicalement la radiotechnique et ont déterminé l'élaboration des

calculatrices électroniques, et enfin maîtrisa les techniques laser. Ce sont ces trois grands domaines techniques qui déterminèrent en fait l'événement de ce que l'on appelle la révolution scientifique et technique.

Dans ce paragraphe, il ne sera question que de lasers. Réfléchissons à tout ce qui nous empêche de produire, par les procédés traditionnels, un faisceau lumineux puissant et directionnel.

Un faisceau lumineux de grande puissance aussi étroit soit-il diverge et son intensité énergétique diminue à mesure qu'on s'éloigne de la source. Ce n'est que dans le roman de fiction scientifique d'Alexeï Tolstoï que son personnage crée un «hyperboloïde» permettant de produire des rayons lumineux pouvant transmettre à grande distance une énorme énergie radiante suffisante pour détruire les obstacles. Il est parfaitement possible de fabriquer un miroir concave permettant de produire un pinceau de rayons parallèles en disposant une source ponctuelle en son foyer. Or une source ponctuelle, c'est une abstraction mathématique et on ne peut disposer que d'une source lumineuse de faible étendue. Même si on arrivait à chauffer une petite bille à 6000 K (aucune substance ne saurait être chauffée à plus haute température), on n'obtiendrait qu'un pinceau lumineux d'intensité dérisoire. Si on cherche à augmenter les dimensions de la source, au lieu d'un pinceau de rayons parallèles on obtiendra un faisceau de rayons divergents et l'intensité lumineuse issue du projecteur ira en diminuant rapidement avec la distance.

Le premier obstacle auquel on se heurte lorsqu'on cherche à obtenir un pinceau lumineux de grande puissance, est que les atomes rayonnent dans tous les sens. D'autre part, comme les atomes et les molécules rayonnent sans « se concer-

ter », les rayons émis par différents atomes partent en désordre sans se soucier les uns des autres. De ce fait, les phases des radiations émises par les atomes sont toutes différentes et par suite nombre de rayons émis par des atomes différents se détruisent mutuellement. Le lecteur voudra bien se rappeler que cela se produit lorsque la « bosse » d'une onde vient se superposer au creux d'une autre onde.

Ce sont ces obstacles que permettent de surmonter les rayonnements laser. Le mot *laser* est le sigle de la dénomination anglaise « Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation », ce qui signifie : amplification de la lumière par émission stimulée de radiations.

L'idée de base du rayonnement laser comporte plusieurs composantes. Tout d'abord on se rappellera qu'à côté de l'émission spontanée il existe une émission stimulée qui apparaît chaque fois qu'un photon tombe sur un atome excité. Lorsque l'énergie d'excitation de l'atome est exactement égale à l'énergie du photon, l'impact de ce dernier oblige l'atome à émettre de la lumière ; l'atome émet un photon en passant sur un niveau d'énergie plus basse. L'émission stimulée est remarquable en ce que le photon émis par l'atome est identique au photon qui lui donna naissance non seulement par son énergie, mais aussi par sa phase ; ce nouveau photon est émis avec la même phase que celle du photon initial et dans la même direction de propagation.

La deuxième composante de l'idée de base du laser consiste en ceci. Si on enferme un système d'atomes rayonnants dans un tube dont les bases placées à une distance déterminée l'une de l'autre peuvent servir de miroirs pour les photons qui nous importent, on arrive à rassembler dans ce tube une multitude de photons générés par des

atomes également excités, en les obligeant à faire un grand nombre d'allers et retours dans le tube.

La troisième composante du principe du laser consiste à allonger le temps de séjour des atomes à l'état excité puis après ce « pompage » à les obliger à transiter simultanément avec émission de rayonnement. La réalisation de l'idée du laser, i.e. la multiplication des photons à partir d'un seul photon incident jusqu'à obtention de milliards de photons qui lui sont identiques doit permettre de produire un rayon lumineux d'une intensité sans précédent. Un tel pinceau ne s'étalerait que dans une mesure négligeable et l'énergie répartie sur sa section droite pourrait atteindre une valeur énorme.

Pendant plusieurs décennies personne ne put imaginer un dispositif qui permît de réaliser l'idée du laser. Dès les années trente, V. A. Fabrikant avança quelques suggestions dans la bonne voie ; plus tard les recherches opiniâtres des physiciens soviétiques A. M. Prokhorov et N. G. Bassov et du physicien américain Ch. Townes, futurs lauréats du prix Nobel de Physique, leur permirent de créer des lasers.

Supposons que le système ne dispose que de deux niveaux d'énergie. La majorité des atomes ou des molécules occupent le niveau inférieur ; sous l'action de chocs d'origine thermique, certaines molécules peuvent venir occuper le niveau supérieur pendant un temps court ; mais la molécule retournera bientôt sur le niveau inférieur avec émission de radiation ; la plupart des atomes passent spontanément sur le niveau inférieur ; les transitions stimulées sur le niveau inférieur sont rares parce que le nombre d'atomes excités est petit.

Supposons qu'on ait réussi à trouver une subs-

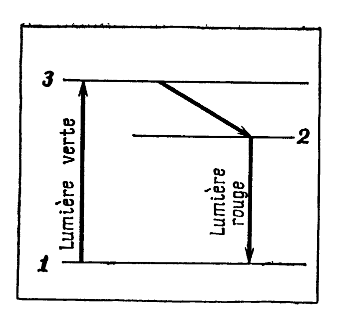


Fig. 1.5

tance dont les atomes disposent de trois niveaux d'énergie, dénotés sur la figure 1.5 par les chiffres *1*, *2*, *3*. La distance *1—3* correspond à l'émission d'une lumière verte et la distance *1—2* correspond à l'émission d'une lumière rouge. Posons que la probabilité des transitions du niveau *3* sur le niveau *2* soit des milliers de fois plus grande que la probabilité des transitions du niveau *2* sur le niveau *1*. Eclairons cette substance avec une lumière verte ; les atomes viendront se placer sur le niveau supérieur *3* et de là, par transitions spontanées, passeront sur le niveau *2* et y séjourneront pendant quelque temps. Cette transition est dite non radiative, car l'énergie libérée lors de cette transition se transforme en énergie vibratoire des atomes. Poursuivons nos expériences imaginaires et supposons qu'on soit arrivé à faire passer la majorité des atomes sur le niveau *2* ; cela signifie qu'on a réussi à réaliser une inversion de population, i.e. une occupation anomale des niveaux : les niveaux supérieurs *2* sont plus peuplés que les niveaux inférieurs *1* ; cette situation ne se réalise jamais lorsque les processus sont déterminés par l'agitation thermique.

Les transitions du niveau *2* sur le niveau *1* commenceront cependant à se produire ; le photon créé lors d'une transition *2—1* trouvera sur son

chemin d'autres atomes excités occupant le niveau *2* ; mais l'impact du photon sur un de ces atomes déterminera non pas son absorption par l'atome, mais la création d'un nouveau photon. Ainsi au photon primitif créé par une transition spontanée *2—1* viendront s'ajouter des photons identiques créés par les transitions stimulées.

Ainsi se forme un flux de photons *2—1*. Tous les photons sont identiques et créent un rayon de très grande intensité lumineuse.

C'est ce processus que réussirent à réaliser les physiciens qui ont été cités ci-dessus. Le premier laser fut un laser au rubis. Le schéma des niveaux représenté sur la figure 1.5 est celui du rubis dopé au chrome.

Pour faire fonctionner un laser, il faut disposer d'une source d'excitation qui assurera le « pompage » du laser, i.e. qui fera passer les atomes sur le niveau supérieur.

Si le corps de travail du laser est un corps solide, on lui confère la forme d'un cylindre dont les bases font office de miroirs. Si le corps de travail est liquide ou gazeux, on le dispose dans un tube muni de miroirs ; en réglant à l'aide de vis micrométriques la position mutuelle des miroirs, on contrôle la longueur du tube, afin de créer des conditions optimales pour les photons dont un multiple de la longueur d'onde est égal à la longueur effective du tube. Ce n'est qu'à cette condition que toutes les ondes électromagnétiques s'additionnent.

On peut affirmer que la principale particularité des lasers est leur aptitude à produire un flux d'énergie radiante très directionnel. Le rayon laser peut avoir une section droite aussi petite que l'on veut. On y arrive en pratique en obligeant le rayon à se propager dans un capillaire en verre de longueur convenable. Les photons dont

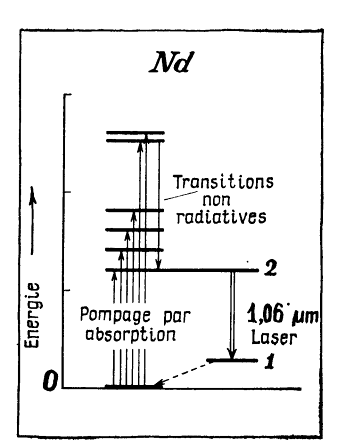


Fig. 1.6

la direction de propagation est inclinée sur l'axe du capillaire ne participeront pas au processus de multiplication des photons. La cavité résonnante (ici ce sont les miroirs qui réfléchissent les photons et les obligent à effectuer des trajets dans les deux sens pendant toute la période de pompage) n'assure la multiplication que des photons se propageant dans un sens donné. Dans certains cas où un angle de divergence de un degré environ paraît trop grand, on place sur le trajet du rayon (en dehors du laser) une lentille collectrice.

Lorsqu'il s'agit de grandes puissances, les lasers sont des installations techniques compliquées. On produit dans le tube une impulsion initiale qui peut être appliquée ensuite aux amplificateurs dont le principe de fonctionnement est le même que celui du tube primaire, mais qui sont pompés de façon indépendante. On n'a pas à entrer dans les détails de fonctionnement, car ce qui importe, ce sont les principes physiques du pompage et de l'émission d'un rayonnement la-

ser. Or ces principes peuvent être très différents, comme en témoignent les figures 1.6 à 1.8, illustrant les schémas de fonctionnement des lasers utilisés aujourd'hui pour produire des rayonnements laser de grande puissance.

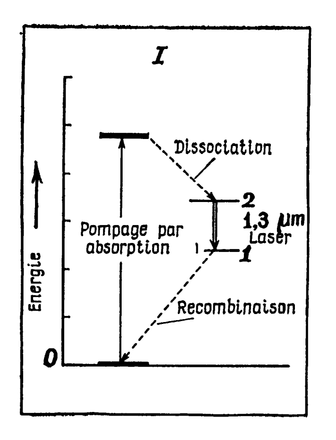
Le schéma des niveaux du laser au néodyme est représenté sur la figure 1.6. Cette dénomination peut prêter à confusion ; le corps de travail du laser n'est pas le métal néodyme mais un verre ordinaire dopé au néodyme. Les ions des atomes de néodyme sont répartis au hasard parmi les atomes de silicium et d'oxygène. Le pompage du laser est assuré par des lampes-éclairs (flashs) qui produisent un rayonnement dont les radiations ont des longueurs d'onde comprises entre 0,5 et 0,9 μm. Sous l'action de cette lumière apparaît une large bande d'états excités. Nous l'avons représentée arbitrairement par cinq traits. Les atomes effectuent des transitions non radiatives sur le niveau laser supérieur (dénoté ici et sur les deux schémas suivants par le chiffre *2*). Chaque transition libère une quantité d'énergie différente qui est aussitôt convertie en énergie de vibration de tout le « réseau » d'atomes.

Le rayonnement laser, qui résulte de transitions du niveau supérieur sur le niveau inférieur *1*, a une longueur d'onde égale à 1,06 μm.

La transition (indiquée en pointillé) du niveau *1* sur le niveau fondamental ne participe pas à l'émission laser et son énergie est libérée sous forme d'une lumière non cohérente.

Les lasers au néodyme permettent d'obtenir des puissances de rayonnement énormes atteignant 10^{12} W. L'énergie est émise sous forme d'impulsions d'une durée de 0,1 ns.

Ce laser est concurrencé depuis peu par les lasers utilisant les transitions entre les atomes excités d'iode (fig. 1.7). Le fluide moteur est le gaz



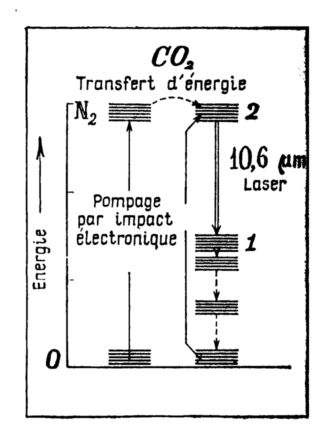


Fig. 1.7

Fig. 1.8

C_3F_7I. Le pompage est encore assuré par des flashs, mais la nature des processus physiques est ici toute autre. On utilise pour le pompage une lumière ultraviolette de longueur d'onde égale à 0,25 μm. Sous l'action de cette lumière les molécules du gaz de travail sont dissociées, et chose remarquable, les atomes d'iode détachés des molécules d'origine se trouvent aussitôt dans un état excité! Le procédé mis en œuvre ici pour réaliser l'inversion de population est très différent du précédent. La transition active *2* → *1* donne lieu à l'émission d'un rayonnement laser de 1,3 μm de longueur d'onde ; après transition l'atome d'iode se recombine avec les restes des molécules.

Il est possible que le lecteur averti ait déjà entendu parler de lasers à hélium-néon qui permettent d'obtenir un rayon infrarouge de 1,13 μm de longueur d'onde et de grande intensité. Comme ces lasers ne battent pas de records de puissance

rayonnée, on considérera le schéma des niveaux du laser à mélange d'azote et de gaz carbonique (fig. 1.8).

Au préalable, il faut expliquer pourquoi on utilise des mélanges de gaz. La raison en est que certains atomes et molécules sont plus faciles à exciter, tandis que certains autres émettent plus facilement un rayonnement lumineux. C'est pour cela que dans un laser utilisant un mélange de gaz l'énergie de pompage est absorbée par des particules d'une espèce ; par chocs, ces particules cèdent l'énergie acquise aux atomes et molécules de l'autre espèce et ce sont ces derniers qui assurent l'émission du rayonnement laser.

On utilise actuellement des mélanges de plusieurs gaz ; dans le laser à mélange d'azote et de gaz carbonique, quoique ce soient ces deux gaz qui assument les principales fonctions, il est recommandé d'y adjoindre différents adjuvants, y compris l'hélium.

Le pompage d'un laser, où sont actives les molécules CO_2, s'effectue autrement que dans les cas précédents. Le mélange des gaz est contenu dans un tube à décharge auquel on applique une tension suffisante pour y créer un état de plasma. Les électrons animés de mouvements rapides excitent les vibrations des molécules d'azote. Le schéma montre l'ascension de ces molécules à l'étage supérieur. La valeur de la tension appliquée aux électrodes doit être telle que l'énergie d'excitation des molécules d'azote soit voisine de 2 eV.

La molécule d'azote joue le rôle d'intermédiaire ; elle ne rayonne pas et transmet l'énergie, que lui ont cédée les électrons, à une molécule de CO_2 afin de la transférer sur un niveau laser supérieur.

Les niveaux laser supérieurs *2* constituent

l'appartement du troisième étage des molécules CO_2. La durée de vie des molécules de ce gaz sur ce niveau est de 0,001 s environ. Ce n'est pas un temps insignifiant et la molécule possède des chances appréciables d'y rencontrer un photon d'énergie convenable qui l'obligera à aller s'installer à l'étage au-dessous.

On notera que les transitions entre « appartements » sont beaucoup plus fréquentes qu'entre « étages ». La durée de vie sur un niveau rotatoire est de l'ordre de quelques dix-millionièmes de seconde. C'est grâce à cette circonstance heureuse que l'on peut considérer que les populations de chaque étage sont stables. C'est pour cela qu'à l'aide d'un montage de réglage de la distance entre les miroirs, on arrive à choisir une transition déterminée, par exemple une transition menant du sixième appartement du troisième étage au cinquième appartement du deuxième étage.

Pour procéder à l'engineering des lasers, les ingénieurs doivent disposer de renseignements complets sur les temps de séjour des atomes sur les différents niveaux disponibles et sur les probabilités de leurs transitions, afin de pouvoir choisir l'émission laser optimale pour un mélange gazeux donné. On accorde les lasers au gaz carbonique sur la longueur d'onde de 10,5915 μm.

Afin que le laser fonctionne correctement, il faut faire en sorte que les molécules ne séjournent pas sur le niveau laser inférieur et qu'elles vident les lieux aussitôt arrivés. A une pression de 1 mm Hg, les molécules de CO_2 subissent 100 chocs par seconde et évacuent ce niveau. En présence d'hélium, le nombre de chocs s'élève à 4000 et en présence de molécules d'eau, à 100 000. On voit que cela fait une grande différence.

Par un choix adéquat des adjuvants au gaz arbconique, on arrive à faire varier la puissance

débitée par le laser. Les spécialistes semblent donner leur préférence à ce type de laser pour les grandes puissances.

Un laser à CO_2 émet un rayon lumineux qui après focalisation possédera une section droite de 0,001 cm² et une intensité lumineuse de 1000 kW/cm² en régime continu et de 1 000 000 kW/cm² en régime pulsé avec des impulsions d'une durée de 1 ns.

La composition des matériaux pour lasers relève plutôt de l'art que de la science ; il faut faire preuve d'intuition, d'imagination et de mémoire pour élaborer un laser efficace.

La très grande intensité et l'excellente cohérence des rayonnements laser rénovèrent de fond en comble de nombreux domaines techniques. Au cours de la dernière décennie, la fabrication des lasers se fait à grande échelle industrielle. On les utilise en qualité d'émetteurs pour la transmission d'énergie et d'information. Des recherches très actives se développent pour tester les possibilités d'utilisation des lasers pour provoquer des réactions thermonucléaires. On utilise les lasers en qualité d'instrument de chirurgie et pour la séparation des isotopes. Dans ce qui suit, nous aurons encore l'occasion de revenir sur les applications des lasers.

LA LUMINESCENCE

Le rayonnement thermique est une propriété universelle de tous les corps. Un rayonnement thermique est émis par les corps se trouvant à toutes les températures, le zéro absolu y compris. Les spectres des rayonnements thermiques sont continus et sont représentés par des courbes que nous avons déjà décrites. Il est vrai qu'il n'a été question que de la courbe spectrale du corps

noir ; mais la courbe spectrale d'un corps coloré quelconque n'est pas très différente. La seule différence notable est que les courbes spectrales des corps colorés présentent des distorsions. Mais la croissance de l'énergie de rayonnement et le déplacement du maximum du côté des ondes courtes avec l'élévation de la température du corps sont des phénomènes généraux.

L'émission de n'importe quelle radiation est déterminée par le passage de particules d'un niveau d'excitation de départ à un niveau inférieur de retour. Les causes d'excitation des atomes et des molécules sont très diverses. Dans le cas du rayonnement thermique, l'excitation résulte de chocs résultant de l'agitation thermique des particules.

Mais ce n'est pas l'unique cause d'émission des radiations par un corps. Le phénomène de luminescence que nous allons décrire ici a une autre origine. La luminescence fait intervenir des processus d'excitation des molécules n'exigeant pas d'élévation de la température des corps. L'excitation des atomes et des molécules résulte des chocs avec les électrons ou les photons, d'actions mécaniques (triboluminescence), du frottement, etc.

Pratiquement, toutes les substances sont susceptibles de luminescence, mais seules quelques substances spéciales appelées luminophores (ou phosphores) ont des intensités lumineuses suffisantes pour avoir des applications pratiques.

Les luminophores servent au revêtement des écrans des tubes de télévision et des oscillographes. Dans ce cas, la luminescence est provoquée par les chocs électroniques. On obtient une bonne luminescence en éclairant certaines substances par des radiations ultraviolettes. Dans tous les cas, l'énergie des photons incidents doit être plus

grande que l'énergie des photons émis. Il s'ensuit que le quantum incident peut faire partie de la partie invisible du spectre et les quanta émis appartiendront à la région visible.

Une substance luminogène disséminée en très petites quantités (quelques milliardièmes) se laisse déceler dès qu'on éclaire la substance par des radiations ultraviolettes. C'est pour cela que l'analyse par luminescence trouve des applications en analyse chimique pour déceler des traces d'impuretés.

Les parois des lampes dites à lumière du jour sont revêtues de couches de substances luminescentes.

Les phénomènes de luminescence se divisent en deux catégories: la fluorescence et la phosphorescence. La fluorescence est une émission de lumière par les atomes et les molécules, qui se produit sans que ces particules s'attardent sur les niveaux excités. La phosphorescence, par contre, est un phénomène qui peut se manifester avec un retard important. Cela peut se produire si, après excitation, le système passe sur un niveau métastable qui est tel que la probabilité de transition sur des niveaux inférieurs est petite. L'émission de lumière se produit généralement après que les molécules auront absorbé de l'énergie et se seront placées sur un niveau de plus grande énergie, à partir duquel se réalisera la transition directe sur un niveau inférieur, sans faire halte sur le niveau intermédiaire métastable.

Disons quelques mots concernant l'électroluminescence qui s'observe dans certaines diodes à semiconducteur à la frontière des jonctions *p-n*. Ce phénomène très curieux a une énorme importance pratique car il sert de base à l'élaboration de lasers à semiconducteur. L'émission de lumière

résulte de la recombinaison des électrons et des trous qui s'accompagne de l'émission de photons.

Afin que ces transitions se produisent continuellement, on fait passer un courant électrique à travers la diode. Pour qu'il y ait électroluminescence, il faut trouver un matériau semiconducteur satisfaisant à plusieurs conditions. Tout d'abord, il faut que le passage du courant injecte des électrons dans le semiconducteur de type *p*, i.e. dans le semiconducteur où la majorité des porteurs sont des trous ; ou bien que le courant injecte des trous dans le semiconducteur de type *n*. L'injection de porteurs est une condition nécessaire, quoique d'autres facteurs, comme par exemple la vitesse de transition du niveau supérieur sur le niveau inférieur, puissent jouer un rôle déterminant. Il existe des cas où tous les facteurs favorisent la transition des électrons de haut en bas et c'est alors que l'on observe l'électroluminescence.

Le composé semiconducteur arséniure de gallium convient particulièrement bien à l'émission électroluminescente. Dans ce matériau, le nombre de photons créés est suffisant et ces photons se propagent le long de la jonction *p-n*. Si on polit les deux faces perpendiculaires à la jonction, on réalise une cavité résonnante. Comme les photons qui sont générés par recombinaison des électrons et des trous ont tous la même phase, pour des intensités de courant suffisamment grandes, le rayonnement émis est en tout point semblable aux rayonnements générés par les lasers, notamment en ce qui concerne l'épaisseur du rayon, sa directivité et sa polarisation.

Les lasers à semiconducteur émettent des radiations de différentes longueurs d'onde, depuis l'ultraviolet jusqu'à l'infrarouge et trouvent de nombreuses applications.

CHAPITRE 2

INSTRUMENTS D'OPTIQUE

LE PRISME

Les collections d'instruments d'optique que l'on utilise dans les laboratoires de recherche et dans l'industrie changent tellement vite qu'un chercheur qui, pour une raison ou pour une autre, aura abandonné la recherche et qui reviendrait au laboratoire dans une vingtaine d'années, serait obligé de tout rapprendre. Mais de nos jours, de même que dans un avenir lointain, ce chercheur retrouvera, dans toute collection d'instruments d'optique, le prisme et la lentille. Il est par suite tout indiqué de rappeler au lecteur les lois simples qui régissent la marche des rayons lumineux à travers les prismes et les lentilles en différents matériaux transparents. D'ailleurs la transparescence est une notion relative, puisque pour certaines ondes électromagnétiques le bois et le béton sont transparents.

Les lois qui régissent la rencontre d'un rayon avec des corps susceptibles de le réfléchir ou de le réfracter sont simples tant que l'aspect ondulatoire de la lumière ne se manifeste pas. Ces lois sont la loi de la réflexion (l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion) et la loi de la réfraction de la lumière.

Lorsqu'un rayon lumineux tombe sur la surface de séparation de deux milieux, il s'écarte de sa direction de propagation initiale. L'angle d'incidence i est lié à l'angle de réfraction r par la relation

$$n = \frac{\sin i}{\sin r}.$$

Cette loi fut établie à la suite de nombreuses mesures par W. Snellius (1580-1626), professeur à l'Université de Leyde. Le contenu des cours qu'il dispensait aux étudiants et qui avaient trait aux phénomènes qui se manifestent lorsque la lumière rencontre des corps transparents, était bien connu dans les milieux scientifiques de son temps.

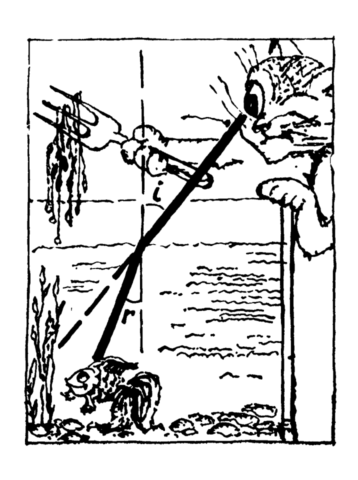
C'est probablement pour cela que la publication, par René Descartes, en 1637, d'un article intitulé « Discours de la méthode » où il démontrait la loi de la réflexion de la lumière à l'aide de raisonnements qui nous paraissent bien étranges, provoqua des commentaires ironiques de la part de ses contemporains. Les propositions nébuleuses de Descartes ne forcèrent pas l'admiration de ses collègues.

Il n'est pas douteux que nous aussi nous aurions fait des réserves à propos de cet article de Descartes où il envisage une balle lancée contre un filet fragile. La balle rompt le filet et perd la moitié de sa vitesse. A ce moment, écrit Descartes, le mouvement de la balle devient tout à fait différent de sa destination dans l'un ou dans l'autre sens. Il est difficile de comprendre ce que cela signifie. Il est possible que Descartes voulait signifier que la composante horizontale de la vitesse de mouvement de la balle reste constante et que seule la composante verticale change, puisque c'est dans cette direction que le filet se trouve sur le trajet.

Revenons à la loi de la réfraction.

On repère les angles i et r par rapport à la normale à la frontière des milieux, comme indiqué sur la figure 2.1. La grandeur n qui porte le nom d'indice de réfraction dépend de la nature des milieux considérés. Pour pouvoir comparer les propriétés optiques de corps différents, il est commode de dresser un tableau des indices de

Fig. 2.1



réfraction pour le cas où le rayon incident se propagerait dans l'air avant de tomber sur la surface de séparation des milieux et de pénétrer dans le second milieu (en toute rigueur, le rayon incident devrait se propager dans le vide). Dans ce cas, l'angle de réfraction sera toujours plus petit que l'angle d'incidence et par conséquent l'indice de réfraction sera supérieur à l'unité.

En général, l'indice de réfraction croît avec la densité du milieu ; par exemple, l'indice de réfraction du diamant est égal à 2,4 et celui de la glace à 1,3.

On ne reproduit pas ici le tableau des indices de réfraction mais si on devait le faire, on devrait indiquer à quelles longueurs d'onde correspondent les valeurs des indices de réfraction tabulés. En effet, la valeur de l'indice de réfraction dépend de la longueur d'onde de la lumière. C'est là un phénomène de grande importance qui détermine le principe de fonctionnement des instruments qui servent à décomposer les rayonnements

électromagnétiques en spectres ; on l'appelle phénomène de dispersion.

Lorsque la lumière se propage d'abord dans un milieu plus dense et pénètre ensuite dans un milieu moins dense, elle peut y subir une réflexion interne totale ; dans ce cas l'indice de réfraction est inférieur à l'unité. A mesure que l'angle d'incidence augmente, l'angle de réfraction se rapproche de plus en plus de 90°. Lorsque

$$\sin r = 1, \quad \sin i = n$$

la lumière ne pénétrera plus dans le second milieu et sera complètement réfléchie par la surface de séparation des milieux. Pour l'eau, l'angle de réflexion interne totale est égal à 49°.

On peut mettre à profit la réfraction de la lumière par une plaque transparente plane pour « déplacer » le rayon de côté, parallèlement à lui-même. Si on place un prisme sur le trajet de la lumière, on arrive à faire dévier le rayon.

Le lecteur retrouvera l'établissement de la formule de l'angle de déviation D du rayon dans n'importe quel manuel de physique scolaire ; la démonstration de la formule se fonde sur des considérations de géométrie élémentaire, mais les expressions que l'on obtient sont compliquées surtout si le prisme est épais et si l'angle d'incidence du rayon sur le prisme est arbitraire. Mais si on considère le cas d'un prisme mince et un angle d'incidence peu différent d'un angle droit, la formule est toute simple :

$$D = (n - 1)\, p,$$

où p est l'angle au sommet du prisme.

A la fin du XVIIe siècle, Newton démontra pour la première fois que la lumière blanche n'était pas monochrome et était formée par des rayons de couleurs différentes. Les rayons ultraviolets

sont déviés le plus fortement et les rayons rouges le moins fortement. C'est pour cette raison qu'on dit rayons ultraviolets et infrarouges et non infraviolets et ultrarouges.

C'est en 1672 que le monde scientifique apprit la découverte de Newton. Newton décrivit ses expériences d'une façon parfaitement claire et exacte. Dans cette publication s'étale tout le génie de Newton, mais en ce qui concerne le langage utilisé, on a beaucoup de mal à suivre les développements de l'auteur ; on arrive cependant à démêler que, contrairement à son engagement de décrire les faits sans faire d'hypothèses (« hypothesis non fingo » de Newton), Newton ne tient pas parole. De nombreux axiomes et définitions nous paraissent curieux (par exemple, « le rayon de lumière en est sa plus petite partie »).

A ce jour, les chimistes utilisent les spectrographes dont la partie essentielle est le prisme de Newton. Le matériau du prisme doit être fortement dispersif. Les prismes utilisés dans les spectrographes sont fabriqués en quartz, en fluorine, en sel gemme. On fait passer la lumière à analyser à travers un collimateur à fente, placé dans le plan focal de la lentille d'entrée. On obtient un faisceau de rayons parallèles qui vient tomber sur le prisme. Les photons de fréquences différentes en émergent dans des directions différentes. Une deuxième lentille placée à la sortie rassemble des photons identiques en un même point du plan focal. En cas de besoin, on peut examiner le spectre à l'œil nu ; il suffit de disposer un verre dépoli dans le plan focal de la lentille de sortie ; on peut photographier le spectre.

De nos jours, on enregistre les spectres à l'aide d'enregistreurs automatiques. On fait défiler le long du spectre un récepteur d'énergie constitué par un élément photoélectrique ou thermoélectri-

que qui débite un courant proportionnel à l'intensité lumineuse. Ce courant fait dévier le chariot mobile de l'enregistreur à la manière dont le courant débité par un galvanomètre fait dévier son aiguille. Le chariot mobile est muni d'un stylo enregistreur qui trace le spectre sur une bande de papier qui défile à vitesse constante.

LA LENTILLE

Toute une industrie s'occupe de la fabrication des lentilles. Les corps transparents délimités par deux surfaces sphériques ou par une surface sphérique et une surface plane peuvent avoir les dimensions les plus diverses. Dans certains instruments on utilise des lentilles de 1 cm de diamètre, tandis que dans les grands télescopes le diamètre des lentilles peut atteindre plusieurs mètres. La fabrication des lentilles de grande dimension demande beaucoup de virtuosité, car une bonne lentille doit être homogène.

Tout le monde connaît les lentilles; les lentilles grossissent les objets observés et focalisent les rayons lumineux. En rassemblant les rayons solaires à l'aide d'une lentille, on arrive facilement à enflammer le papier. La lentille rassemble les rayons en un point; ce point est le foyer de la lentille.

L'application de la loi de réfraction et des considérations géométriques simples permet de démontrer que les rayons parallèles se rassemblent en un point ou qu'une lentille, au foyer de laquelle on dispose une source lumineuse ponctuelle, produit un faisceau de rayons parallèles.

Si la source ponctuelle ne se trouve pas au foyer mais est déplacée d'une distance a du centre de la lentille, les rayons qu'elle émet seront rassemblés à une distance a'. Ces deux distances

sont liées l'une à l'autre par la formule

$$\frac{1}{a}+\frac{1}{a'}=\frac{1}{f},$$

où f est la distance focale de la lentille.

On démontre aisément que les rayons lumineux issus d'un objet situé à une distance supérieure au double de la distance focale en forment une image renversée réduite dans le rapport a'/a et située entre le foyer et le double de la distance focale.

Si on déplace l'objet à l'endroit où s'était formée l'image, la nouvelle image se formera à l'endroit où se trouvait précédemment l'objet. C'est une manifestation du principe de la réversibilité du sens de propagation des rayons.

Lorsqu'on utilise une lentille comme loupe, l'objet doit se trouver entre la lentille et son foyer. Dans ces conditions, l'image n'est pas renversée et se forme du même côté que celui où se trouve l'objet (fig. 2.2).

Examinons la différence entre la loupe et les deux autres conditions d'utilisation de la lentille citées plus haut. Pour une position convenable de l'objet la loupe crée une image virtuelle, tandis que lorsque l'objet occupe des positions différentes, on obtient des images que l'on peut observer sur un écran ou photographier. Dans ces derniers cas, on dit que l'image est réelle.

Le grossissement que permet d'obtenir la loupe est d'autant plus grand que sa distance focale est petite. Les performances limites des loupes sont fort modestes. L'angle sous lequel on voit une image virtuelle ne peut être que 20 à 30 fois plus grand que l'angle sous lequel on voit l'objet à l'œil nu.

Nombre d'instruments d'optique pourraient être grandement simplifiés et ne comporteraient

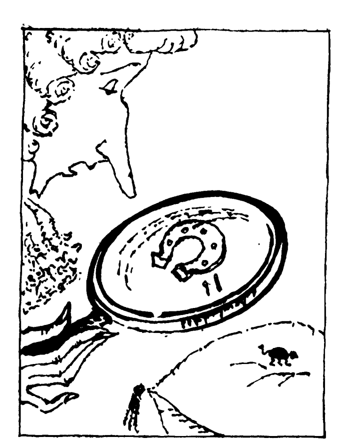


Fig. 2.2

chacun qu'une seule lentille si les lentilles n'avaient des défauts qui leur sont inhérents. Nous voulons qu'un faisceau cylindrique de lumière blanche soit rassemblé par la lentille en un point, mais le phénomène de dispersion s'y oppose. Comme les photons de différentes couleurs sont déviés par la lentille dans des directions différentes, à la place d'une image ponctuelle on obtient une image linéaire colorée, confondue avec l'axe de la lentille. C'est l'aberration chromatique.

Un autre défaut important est l'aberration sphérique. Les rayons qui sont plus proches de l'axe de la lentille seront focalisés dans un point plus lointain que les rayons qui suivent des trajectoires éloignées de l'axe.

Les rayons qui tombent sur la lentille sous des angles grands et petits se comportent différemment et à la place d'un point on obtient une petite tache brillante décalée par rapport à la position régulière de l'image. La tache possède

une queue et ressemble à une virgule ; on l'appelle la coma (du grec *komê*, chevelure).

Il y a encore d'autres types de déformations de l'image que produit une lentille. Si on observe un carré, on verra un rectangle dont les sommets sont reliés par des lignes concaves en dedans. Cette forme de l'image résulte de ce que les rayons issus des sommets et du milieu des côtés du carré sont réfractés différemment.

Les ingénieurs d'étude des instruments d'optique sont confrontés à un défaut qui porte le nom d'astigmatisme. L'image d'un point se trouvant à grande distance de l'axe optique principal d'une lentille se scinde en deux traits perpendiculaires l'un à l'autre et décalés en sens opposés par rapport à la position de l'image parfaite.

Il existe d'autres déformations des images, nous en avons cité cinq, tandis que les spécialistes en dénombrent sept.

Comme cela arrive généralement dans la fabrication industrielle, la production de lentilles de bonne qualité est affaire de compromis. De toute évidence, les aberrations doivent augmenter avec les dimensions des lentilles, mais d'un autre côté l'éclairement de l'image (i.e. le nombre de photons de lumière visible tombant sur l'unité de surface) est proportionnel au carré du diamètre de la lentille (i.e. à son aire). Supposons que l'objet dont la lentille forme l'image en est fort éloigné. L'image se formera alors au foyer et plus la distance focale est petite, plus l'image sera petite. Autrement dit, le flux lumineux envoyé par l'objet sera rassemblé sur une aire d'autant plus petite que la distance focale est petite. L'éclairement de l'image variera en raison inverse de la distance focale de la lentille.

C'est en tenant compte de ces deux particularités que l'on définit la clarté d'une lentille par

le carré du rapport de son diamètre à sa distance focale.

Ce sont les lentilles épaisses, i.e. les lentilles délimitées par des surfaces de petits rayons, qui possèdent la plus petite distance focale. Mais ces lentilles donnent lieu aux plus fortes aberrations. On en conclut qu'un accroissement de la clarté de la lentille dû soit à un accroissement de son diamètre, soit à une diminution du rayon de courbure de ses faces, s'accompagne d'une mauvaise qualité des images. On se rend compte que les techniciens n'ont pas la vie facile.

L'APPAREIL PHOTOGRAPHIQUE

L'appareil photographique le plus simple se présente sous forme d'une boîte opaque percée d'un orifice où on ajuste une lentille qui fait fonction de fenêtre. L'image formée par la lentille impressionne une plaque photographique disposée dans la boîte, en face de la fenêtre.

Comme toute lentille simple produit des images déformées, on la remplace par une association de lentilles adaptées les unes aux autres, afin de supprimer tous les défauts optiques. Ce système porte le nom d'objectif photographique.

Que faut-il faire pour supprimer les aberrations ? Il y a longtemps qu'on proposa d'utiliser un système de lentilles choisies de façon que les défauts des unes soient compensés par les défauts des autres. Ce principe d'obtention d'un « plus » par multiplication de deux « moins » permettrait de supprimer en principe l'ensemble des sept défauts en n'utilisant que trois lentilles. Mais c'est de la théorie et pour obtenir de bonnes images, on doit élaborer des combinaisons de lentilles beaucoup plus compliquées ; l'une de ces combinaisons, qui est loin d'être la plus compli-

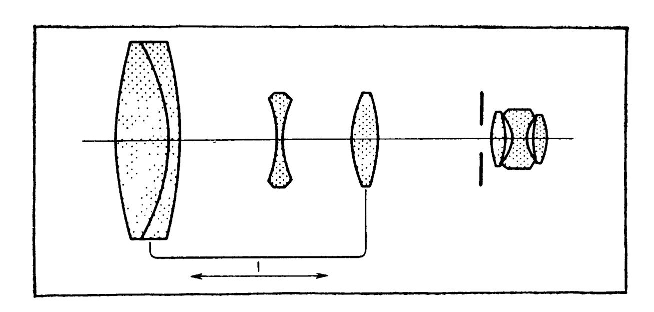


Fig. 2.3

quée, est représentée sur la figure 2.3. Ce système de lentilles convexes et concaves peut former des images peu déformées avec des grossissements différents. On peut déplacer l'une par rapport à l'autre la première et la troisième partie constitutive du système, ce qui permet de faire varier de trois fois la distance focale de l'objectif.

Tout appareil photographique doit être muni d'un dispositif de mise au point, qui est un accessoire simple. Il s'agit de faire varier la distance séparant le centre de l'objectif et la pellicule photosensible. On trouve encore de nos jours des appareils à chambre pliante qui permettent de faire des photos de qualité satisfaisante.

Dans les appareils modernes qui tiennent tout entiers dans le creux de la main, la mise au point se fait par déplacement de la monture de l'objectif. Il ressort des considérations relatives à la puissance des lentilles que la qualité des images s'améliore lorsqu'on diminue autant qu'il peut se faire la pupille d'entrée de la chambre. On y arrive à l'aide d'un diaphragme à iris ; on diminue la dimension de la pupille d'entrée tout en veillant à ce qu'elle laisse entrer assez de lumière

pour former une bonne image au bout d'un temps d'exposition convenable.

Les personnages que l'on voit sur les photographies anciennes semblent figés et manquent de naturel ; la raison en est bien simple : le photographe des débuts de la photographie était obligé d'utiliser des temps de pose longs et il prononçait la phrase sacramentale : « Ne bougez pas, je photographie ».

Pour pouvoir obtenir de bonnes photos avec des temps de pose aussi courts que possible, on doit réaliser des perfectionnements concernant l'objectif et la pellicule photosensible. Le perfectionnement de l'objectif ne doit pas se limiter au choix de la forme géométrique des lentilles constituant l'objectif, car dans un objectif composé de plusieurs lentilles près de la moitié de la lumière est réfléchie. La conséquence en est, d'une part, une perte de clarté, et d'autre part, l'apparition d'un fond lumineux qui réduit le contraste des images. Pour y remédier, on fait appel à la technique du bleutage (ou de clarification) des éléments d'optique. Cette technique consiste à déposer à la surface des lentilles des pellicules extraminces de matériaux convenables. Par des effets d'interférences, la fraction de lumière réfléchie diminue très notablement. Les objectifs correspondants sont facilement reconnaissables à ce que les verres ont une teinte bleuâtre.

L'autre voie d'amélioration des photos est le perfectionnement des pellicules photographiques.

Il convient d'expliquer sommairement le processus photochimique qui détermine l'enregistrement photographique des images. La couche photosensible se compose de gélatine où sont dispersés de petits cristallites de bromure d'argent additionné de petites quantités d'iodure d'ar-

gent. La taille des cristallites est comprise entre un millième et un dix-millième de millimètre, et le nombre de grains répartis sur une surface de 1 cm^2 est compris entre dix mille et plusieurs centaines de milliers. En examinant une couche photosensible au microscope, on constate que les grains sont assez serrés.

Les photons qui tombent sur un grain de l'émulsion rompent les liaisons entre les atomes d'argent et les atomes d'halogène. Le nombre d'atomes d'argent libérés est exactement proportionnel au nombre de photons incidents. Le photographe doit adopter un temps de pose suffisant pour qu'un grand nombre de liaisons entre les atomes d'argent et de brome soient rompues. Mais le temps de pose ne doit pas être trop long, sinon toutes les liaisons entre les atomes d'argent et de brome seront rompues dans tous les cristallites. Après développement, tous les cristallites dégageront l'argent qu'ils renfermaient et la plaque sera uniformément noircie.

Avec un temps de pose convenable, une image latente se forme sur la plaque photosensible. Dans chaque grain, le nombre des liaisons rompues est proportionnel au nombre de photons qui y sont parvenus. Le développement est l'opération qui permet aux atomes d'argent potentiellement libres de se réunir ; la quantité d'argent libre contenu dans le négatif après développement est proportionnelle à l'intensité de la lumière.

On comprend que les détails les plus fins de l'objet qui peuvent être enregistrés sur la photographie ne sauraient être de dimensions supérieures à celle des grains de bromure d'argent contenus dans la couche photosensible.

Après que la plaque aura été développée, on la soumet au fixage. Le processus de fixage

consiste à éliminer le bromure d'argent qui n'a pas été décomposé par la lumière. Si on ne le fait pas, dès que le négatif sera soumis à l'action de la lumière, il sera aussitôt « voilé », puisque tout l'argent des grains pourra être libéré.

Les principes physiques de l'image positive sont tellement évidents qu'on n'en parlera pas.

La technique moderne de la photographie en couleurs est loin d'être simple et on se doit de l'admirer. Quant aux bases physiques de ce processus, elles sont simples. Le modèle de la perception des couleurs qui a été suggéré dès le XVIII[e] siècle, est encore valable. L'œil humain contient des récepteurs pour les trois couleurs : le rouge, le vert et le bleu. En combinant ces couleurs dans différentes proportions, on arrive à obtenir les colorations les plus diverses. Il s'ensuit que pour obtenir des images en couleurs, on doit utiliser une pellicule à trois couches superposées ; la couche supérieure doit être sensible aux rayons bleus, la couche médiane aux rayons verts et la couche inférieure aux rayons rouges. La manière dont les chimistes usent pour obtenir ce résultat ne nous concerne pas ici. Le négatif en couleurs est transformé en positif en couleurs grâce à du papier photo à trois couches.

L'ŒIL

L'œil est un instrument d'optique extraordinaire. Il permet en effet de distinguer des dizaines de milliers de nuances de toutes les couleurs, de voir à grande et à courte distance, de percevoir avec les deux yeux les rapports en volume des objets et de percevoir des intensités lumineuses très faibles. Il est vrai que l'œil humain n'est sensible qu'aux radiations d'une

région étroite du spectre ; à ce point de vue, les yeux de certains animaux se trouvent dans une situation plus favorable.

La structure de l'œil rappelle celle de l'appareil photographique. Le rôle de l'objectif y est assumé par le cristallin qui a la forme d'une lentille biconvexe ; c'est un corps mou dont la forme change sous l'action des muscles qui l'entourent ; c'est le processus d'accommodation de l'œil qui assure une bonne vision des objets à courte et à grande distance. Avec l'âge, le cristallin devient moins déformable, ce qui oblige à porter des lunettes pour « voir au loin » et pour « lire ».

L'image de l'objet se forme sur la paroi arrière de l'œil et le nerf optique transmet les sensations recueillies au cerveau.

Un œil normal de jeune homme n'est susceptible de discerner les détails d'un objet que si celui-ci se trouve à une distance non inférieure à 10 cm. Avec l'âge, se développe la presbytie et cette distance augmente jusqu'à 30 cm.

Devant le cristallin se trouve la pupille qui joue le même rôle que le diaphragme d'un appareil photographique ; la dimension de la pupille varie dans les limites de 1,8 à 10 mm.

Le rôle de la plaque photographique est assumé par la rétine qui a une structure très compliquée ; sous la rétine on trouve l'épithélium formé de cellules photosensibles appelées cônes et bâtonnets. Vous pouvez comparer le nombre de ces cellules, qui dépasse cent millions, avec le nombre de grains de bromure d'argent dans la plaque photographique. Comme l'homme distingue les couleurs, on conçoit que les cellules de vision ne sont pas également sensibles pour les différentes radiations du spectre. On arrive au même résultat si on postule qu'il existe diffé-

rents groupes de cellules qui sont impressionnées par des radiations de différentes couleurs.

Dans le cas d'une vision normale, le foyer image de l'œil se situe sur la rétine. Si ce foyer se trouve devant la rétine, l'homme souffre de myopie et si le foyer se trouve au-delà de la rétine, c'est la presbytie. Ces deux défauts de vision très largement répandus sont dus à ce que le cristallin est trop mince ou trop épais. Il existe des gens atteints d'astigmatisme ; dans ce cas, à l'état de repos, le cristallin n'a pas la forme régulière d'un corps délimité par deux surfaces sphériques.

On arrive à corriger ces défauts par le port de lunettes qui, conjointement avec le cristallin, doivent constituer un système optique projetant l'image de l'objet sur la rétine.

On caractérise les lentilles des lunettes par le nombre de dioptries. La dioptrie est l'unité de puissance des lentilles ; la puissance d'une lentille est inversement proportionnelle à sa distance focale. La puissance en dioptries est égale à l'unité divisée par la distance focale exprimée en mètres. Les distances focales des lentilles pour myopes sont négatives.

L'angle de vision de l'œil est beaucoup plus grand que nous ne l'imaginons. Certains événements qui se produisent dans une direction à 90° par rapport au regard droit sont enregistrés directement par le subconscient. C'est cette perception qui fait dire aux gens qu'ils « sentent » le regard d'un passant sans qu'ils le voient. L'œil distingue mal les objets qu'il voit sous un angle inférieur à une minute d'arc, même si l'éclairement de l'objet est excellent.

L'onde lumineuse est une onde électromagnétique. On a déjà signalé dans le livre 3 qu'on arrive à démontrer par des expériences directes que le vecteur champ électrique est perpendiculaire à la direction du rayon. Si on essaye d'interpréter ce résultat dans l'aspect corpusculaire, on devra dire que le grain de lumière, i.e. le photon, doit être représenté par une fléchette et non par une petite bille. Les calculs des physiciens théoriciens ont conduit à admettre que le photon possédait un spin (égal à l'unité). La représentation du photon par une fléchette est donc justifiée.

Le rayon lumineux ordinaire est un flux de photons dont les spins sont orientés au hasard ; on dit alors qu'il n'est pas polarisé. Or, dans certains cas, on a affaire à des faisceaux de photons dont tous les spins sont orientés parallèlement ; on peut dire ainsi qu'on a affaire à des ondes électromagnétiques dont le vecteur électrique a une direction bien déterminée. On dit alors qu'il s'agit des rayons polarisés.

Un des procédés de production de rayons polarisés consiste à faire passer un rayon lumineux au travers d'un cristal de basse symétrie. Ces cristaux, lorsqu'ils sont convenablement orientés par rapport au rayon incident, jouissent de la faculté de diviser un rayon de lumière naturelle en deux rayons polarisés suivant des directions rectangulaires.

Il est pratiquement impossible d'expliquer simplement comment se réalise cette polarisation. Dire que les molécules du cristal «accueillent » différemment les ondes dont le vecteur électrique est différemment orienté, n'éclaircira guère la question. Nous souhaitons que le lecteur

nous croît sur parole que la théorie de la séparation en deux rayons existe bien et que c'est une excellente théorie décrivant tous les détails du phénomène. La théorie prédit exactement ce qui se passe lorsqu'on fait tourner le cristal par rapport à la direction du rayon lumineux.

Après avoir divisé le rayon non polarisé en deux rayons polarisés, on arrive sans difficulté à faire dévier l'un de ces rayons de manière à l'éliminer. L'instrument qui permet d'obtenir ce résultat est appelé nicol en l'honneur du physicien anglais William Nicol (1768-1851) qui imagina cet instrument en 1820. Il est curieux de noter qu'à l'époque on interprétait le phénomène de polarisation en termes de la théorie corpusculaire de la lumière et on estimait que ce phénomène apportait une excellente preuve de la justesse de la théorie corpusculaire de la lumière de Newton.

Peu de temps après l'invention du nicol, on découvrit les phénomènes d'interférence et de diffraction de la lumière qui s'interprétaient si aisément en termes de la théorie ondulatoire qu'on rejeta la théorie des corpuscules de lumière. Néanmoins, un siècle plus tard, on assista à la résurrection de cette théorie, mais cette fois sous la forme plus modeste de l'un des aspects du champ électromagnétique.

Si on dispose un nicol sur le trajet de la lumière, l'intensité de celle-ci diminuera de deux fois, comme on pouvait s'y attendre. Mais ce n'est que lorsqu'on disposera un deuxième nicol à la suite du premier qu'on observera un phénomène vraiment intéressant qui démontre d'ailleurs l'existence même de la lumière polarisée. Ce deuxième nicol est appelé analyseur, quoiqu'il ne diffère en rien du nicol polariseur. Faisons tourner le nicol autour de la direction du rayon

lumineux. On constatera que pour une certaine disposition relative des nicols, l'intensité de la lumière est la même qu'en l'absence de nicols. On dit alors que les nicols sont parallèles. Tournons maintenant l'analyseur ; lorsqu'il aura tourné de 90°, la lumière sera éteinte et on dira alors que les nicols sont croisés.

Dans les positions intermédiaires, lorsque le deuxième nicol fait un angle α par rapport à la position parallèle des nicols, l'intensité de la lumière transmise est égale à $^1/_2\ I \cos^2 \alpha$. Cette formule s'interprète facilement en admettant que le vecteur champ électrique est décomposé en deux composantes, l'une perpendiculaire et l'autre parallèle à la « fente » de l'analyseur ; or l'intensité est proportionnelle au carré de l'amplitude de l'onde, i.e. au carré du vecteur électrique. Il s'ensuit que la variation de l'intensité lumineuse est proportionnelle au carré du cosinus de l'angle α.

L'analyse de la lumière polarisée trouve des applications. Supposons que, les nicols étant croisés, on dispose entre eux un corps transparent jouissant de la propriété de faire tourner le vecteur électrique de l'onde ; dans ces conditions le champ de vision s'éclaircit. Les corps soumis à des tensions mécaniques se comportent ainsi ; la rotation du vecteur lumineux dépendant de la tension mécanique, l'éclaircissement du champ de vision des nicols croisés en dépend également. On verra de belles images (colorées puisque les photons de couleurs différentes se comportent différemment) dont l'aspect caractérisera l'état de tension mécanique de l'échantillon ou bien permettra de juger si les molécules de l'objet sont alignées ou sont distribuées au hasard. Ce sont des informations de valeur et c'est pour cela que l'on associe des nicols à un

bon microscope, afin de pouvoir examiner l'image de l'objet en lumière polarisée. Les informations concernant la structure de l'objet seront alors plus riches.

Les solutions de nombreuses substances, notamment les solutions de sucre, font tourner le vecteur électrique de l'onde lumineuse d'un angle rigoureusement proportionnel à la teneur en sucre de la solution. On peut donc utiliser les polarimètres pour mesurer la teneur en sucre des solutions ; on les appelle alors des saccharimètres ; on en trouve dans de nombreux laboratoires chimiques.

Ces deux exemples d'utilisation pratique des polarimètres sont les plus notables, mais il en existe bien d'autres.

LE MICROSCOPE ET LE TÉLESCOPE

La partie optique du microscope se compose d'un oculaire et d'un objectif. L'oculaire est une lentille près de laquelle on applique l'œil ; l'objectif se trouve très près de l'objet, à le frôler. On place l'objet à une distance légèrement supérieure à la distance focale de l'objectif. Dans l'espace compris entre l'oculaire et l'objectif se forme une image renversée et grossie de l'objet. Il faut que cette image se situe entre l'oculaire et son foyer, car l'oculaire joue le rôle de loupe à travers laquelle on examine l'objet. On démontre que le grossissement du microscope est égal au produit des grossissements de l'oculaire et de l'objectif, pris séparément.

A première vue, on s'imagine parfois que le microscope permettrait d'examiner des détails indéfiniment fins des objets. On procède alors au raisonnement suivant: on fait d'abord une

photographie où l'objet apparaît grossi de mille fois; puis on examine cette photographie au microscope et on atteint un grossissement égal à un million, etc.

Ce raisonnement est absolument erroné. Rappelons tout d'abord que le grossissement des clichés photographiques est limité par la taille des grains de la pellicule et que chaque grain de bromure d'argent se comporte comme un tout. Le lecteur a sûrement vu des photographies fortement grossies et a pu remarquer que le grossissement, au lieu d'améliorer la finesse des détails, les rend plus flous.

Mais même si on élimine la photographie de l'objet en observant son image grossie par des moyens optiques (chose parfaitement réalisable puisque rien ne limite le nombre de lentilles que l'on utilise), on se rendra vite compte que dans ce cas aussi un grand grossissement ne sert à rien. C'est l'aspect ondulatoire du champ électromagnétique qui impose une limite au grossissement utile de n'importe quel instrument. Que l'on examine l'objet à l'aide d'un verre grossissant, à l'œil nu, au microscope ou au télescope, dans tous ces cas l'onde lumineuse issue d'un point lumineux doit passer par un orifice. Mais le passage à travers une ouverture donne lieu au phénomène de diffraction qui se traduit par une déviation du rayon de son trajet rectiligne. Tout se passe comme si le rayon pouvait « tourner l'angle » et voir ce qui s'y passe. Par suite de la diffraction, l'image d'un point ne sera jamais ponctuelle, mais se présentera sous forme d'une petite tache dont le diamètre ne peut être inférieur à la longueur d'onde de la lumière.

Il est utile de pouvoir prévoir dans quelles conditions la marche de l'onde électromagnétique peut s'écarter notablement du trajet rectiligne.

En notant x l'écart linéaire par rapport au trajet rectiligne que l'on observe à une distance f de la source, et a la dimension de l'obstacle ou de l'ouverture qui se trouve sur le chemin du rayon, on a la relation suivante:

$$x = \lambda f/a,$$

où λ est la longueur d'onde de la lumière. Il résulte de cette équation qu'on peut observer la diffraction déterminée par les particules les plus fines et par les corps célestes. Tout dépend des longueurs d'onde et des distances auxquelles on a affaire. La même constatation vaut pour les ouvertures; il n'est nullement nécessaire d'envisager des ouvertures minuscules pour voir se manifester la diffraction. Par exemple, une ouverture par laquelle peut passer une balle de tennis permet d'observer des phénomènes de diffraction à condition de se placer à quelques centaines de mètres de l'ouverture.

L'équation simple ci-dessus permet de préciser les limites ultimes des microscopes et des télescopes.

Le microscope ne permet pas de discerner des détails d'un objet inférieurs au micromètre. Les détails de l'ordre du millimètre sont discernables à l'œil nu. Il s'ensuit que lorsqu'on utilise un microscope, il ne sert à rien de vouloir obtenir un grossissement supérieur à mille.

Mais cette limite ne concerne que le microscope optique. Si on arrivait à construire un microscope qui fonctionnerait non pas avec des rayons lumineux, mais avec des radiations de longueur d'onde plus courte, le grossissement utile du microscope pourrait être accru. Ce nouveau type de microscope existe, c'est le microscope électronique que l'on trouve dans de

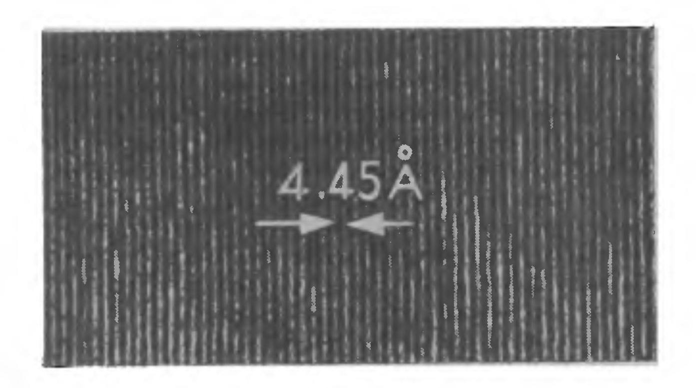


Fig. 2.4

nombreux laboratoires. La longueur d'onde des électrons peut être rendue très petite (cf. p. 145).

A l'aide du microscope électronique on arrive à déceler des détails de structure des substances dont les dimensions sont de l'ordre du dix-millionième de millimètre. Les biologistes ont pu observer les molécules de l'acide désoxyribonucléique, ces longues molécules qui déterminent l'hérédité. On peut observer aussi les molécules des protéines, discerner les détails de structure des membranes des cellules ou des fibres musculaires. Ci-dessus (fig. 2.4), on a reproduit la photographie qui représente, avec un grossissement de plus de 3 millions de fois, le réseau cristallin du minéral pyrophyllithe. On discerne la distance entre les plans réticulaires qui est égale à 4,45 Å.

La limite des possibilités du microscope électronique dépend non pas de son pouvoir de séparation, puisqu'on peut diminuer encore la longueur d'onde des électrons, mais de la visibilité de l'image: la molécule que l'on cherche

à observer doit être déposée sur un porte-objet qui se compose lui aussi de molécules. Il est difficile de distinguer une molécule donnée sur un fond de molécules étrangères à l'expérience.

Le microscope électronique est un instrument compliqué et coûteux. Sa « taille » est généralement de l'ordre de 1,5 m. Les électrons y sont accélérés par une haute tension. Mais qu'est-ce qui produit le grossissement ? Le principe est le même que dans le microscope optique, le grossissement est produit par des lentilles. Il est bien évident que dans un microscope électronique les lentilles ne ressemblent pas du tout aux lentilles du microscope ordinaire. Les électrons sont focalisés par des champs électriques appliqués à des plaques de déflexion perforées ainsi que par des champs magnétiques créés par des bobines.

On connaît un grand nombre d'artifices techniques facilitant la formation des images. A l'aide de microtomes on réalise des coupes extrafines que l'on examine par transparence, les molécules du porte-objet étant teintées par dépôt de vapeurs métalliques. On peut aussi fabriquer une « réplique » de l'objet, i.e. le revêtir d'une pellicule extrafine d'une substance transparente et dissoudre ensuite l'objet lui-même.

La microscopie électronique est un secteur important de la physique qui mériterait qu'on lui consacre un chapitre tout entier. Mais on ne peut le faire dans le cadre restreint de cet ouvrage.

Dès le XVIe siècle, il fut suggéré qu'à l'aide de verres convexes on pourrait observer les corps lointains, mais on ne commettra aucune erreur en disant que la découverte du télescope (plus exactement de la lunette) fut l'œuvre du grand Galilée. La première lunette fut réalisée

en juin 1609 et un an après Galilée fit connaître les résultats de ses premières observations du monde des étoiles.

Tout comme le microscope, la lunette (télescope réfracteur) est en principe une association des deux mêmes lentilles — de l'objectif tourné du côté de l'objet et de l'oculaire auquel on applique l'œil. Puisqu'on examine des objets infiniment lointains, leurs images se forment dans le plan focal de l'objectif. Le plan focal de l'oculaire étant confondu avec le plan de l'objectif, de l'oculaire sortent des pinceaux de rayons parallèles.

Les performances du télescope s'améliorèrent à mesure que l'on fit croître le diamètre de l'objectif. Ainsi, par exemple, avec les grands télescopes on discerne les cratères de la Lune de 1 km de diamètre, tandis qu'à l'aide de petits télescopes on ne voit que des cratères de 150 km de diamètre.

A côté des télescopes à lentilles, on trouve dans les laboratoires des télescopes réflecteurs (à miroirs). Puisqu'il s'agit de l'observation d'objets lointains et que pour cela il faut rassembler dans un foyer les rayons qu'envoient ces objets, au lieu d'utiliser une lentille sphérique, on peut employer un miroir sphérique. L'avantage du miroir est évident : on se débarrasse des aberrations chromatiques. Les inconvénients des télescopes à miroirs sont liés uniquement aux difficultés de réalisation de surfaces sphériques de très haute qualité.

Il est bien naturel que le télescope possède aussi un grossissement limite lié aux propriétés ondulatoires de la lumière. Le rayon envoyé par une étoile donne une image en forme de tache et c'est ce qui impose une limite à la distance angulaire entre les étoiles que l'on arrive à dis-

cerner au télescope. Le souci d'améliorer les performances des télescopes est lié dans ce cas aussi à une augmentation de son diamètre. Il est probable que la limite des potentialités du télescope se situe au voisinage d'un dixième de seconde d'arc.

Au cours de ces dernières années, les techniques nouvelles apportent une aide appréciable aux observations au télescope. Les astronomes peuvent sonder le ciel en enregistrant tout le spectre des ondes électromagnétiques qui nous parviennent des profondeurs du cosmos. Nous donnerons au chapitre 7 quelques brèves indications sur les apports de la physique moderne au labeur des astronomes.

LES INTERFÉROMÈTRES

Plusieurs fois déjà on a insisté sur le fait que le champ électromagnétique présentait un aspect ondulatoire. Les flux de particules telles que les électrons, les neutrons, les protons, etc., présentent eux aussi un aspect ondulatoire. Le son résulte de déplacements mécaniques du milieu, ces déplacements étant régis par des lois ondulatoires. Ces différents processus ont en commun qu'on peut attribuer à toutes les ondes émises une longueur d'onde, une fréquence et une vitesse de propagation qui sont liées entre elles par l'équation $c = \lambda\nu$. Le rayonnement le plus simple est monochrome, ce qui signifie qu'il est décrit par une seule longueur d'onde. Dans le cas général, les rayonnements présentent tout un spectre, i.e. un ensemble d'ondes de différentes longueurs et intensités.

L'aspect ondulatoire des rayonnements apparaît dans deux phénomènes qui se produisent lors de l'addition d'ondes ayant parcouru des

trajets différents ou lors de la diffusion d'ondes par des corps se trouvant sur le chemin du rayon. Un cas particulier très important de la diffusion des ondes est la diffraction ; l'addition des ondes porte le nom d'interférences.

Dans ce paragraphe, il sera question d'interférences de la lumière. Ce phénomène est à la base d'instruments servant à la mesure précise des distances, ainsi que de certaines autres grandeurs physiques. Les instruments qui se fondent sur le phénomène d'interférences sont appelés interféromètres.

Le principe de mesure des distances se ramène au comptage du nombre d'ondes contenues dans le segment de longueur mesuré.

A première vue, on pourrait penser que ces mesures sont faciles à faire. Prenons deux sources lumineuses et faisons converger en un même point les rayons qu'elles envoient. Suivant que les ondes arrivent au point d'observation « bosse contre bosse » ou « bosse contre creux », on verra y apparaître une tache brillante ou noire. Supposons que l'on ait à mesurer la distance à laquelle on voudrait déplacer l'une des sources lumineuses. Lors de ce déplacement, les relations de phase des deux ondes varieront au point d'observation. Il suffit de noter le nombre de successions d'éclairement et d'extinction (sombre-brillant) et connaissant l'arrangement géométrique de l'expérience et la longueur d'onde de la lumière utilisée, on peut calculer la longueur du déplacement.

En principe, tout est correct, mais en procédant comme indiqué, on n'observera aucune succession d'extinction et d'éclairement, l'écran restant constamment éclairé. Notre expérience simple a raté.

Le résultat suivant est indubitable. Deux

rayons lumineux issus de sources différentes se renforcent mutuellement au point de leur convergence. La théorie ondulatoire serait-elle erronée ?

Eh bien non, la théorie est correcte et tout rayonnement électromagnétique se présente sous forme d'ondes. Dans l'expérience décrite, nous sommes partis d'une hypothèse fausse. Pour pouvoir observer des interférences, il faut que le déphasage entre les ondes que l'on superpose soit constant. Or les relations de phase même entre les ondes émises par deux atomes d'une même source lumineuse sont parfaitement arbitraires. On a déjà eu l'occasion d'indiquer que les atomes éjectaient des photons sans se concerter ; il s'ensuit que deux sources lumineuses rayonnent de façon incohérente et produisent des rayonnements incohérents.

On peut se demander alors si le rayonnement cohérent ne serait pas un leurre ? Eh bien non, les rayonnements cohérents existent réellement.

La solution de ce problème est aussi simple qu'élégante : il suffit de faire en sorte que le rayonnement d'un atome s'additionne à lui-même. Pour y arriver, il suffit de diviser en deux le rayon issu d'une source lumineuse et de faire parcourir à ces deux parties des chemins différents, puis de les faire converger en un point donné. En procédant ainsi on observera des interférences et en modifiant la différence de marche des deux parties du rayon initial, on pourra mesurer le déplacement et la longueur en comptant le nombre de successions d'éclairements et d'extinctions.

On a exposé le principe des mesures interférométriques qui a été découvert en 1815 par le physicien français Augustin Fresnel (1788-1827). Examinons les procédés utilisés pour diviser en

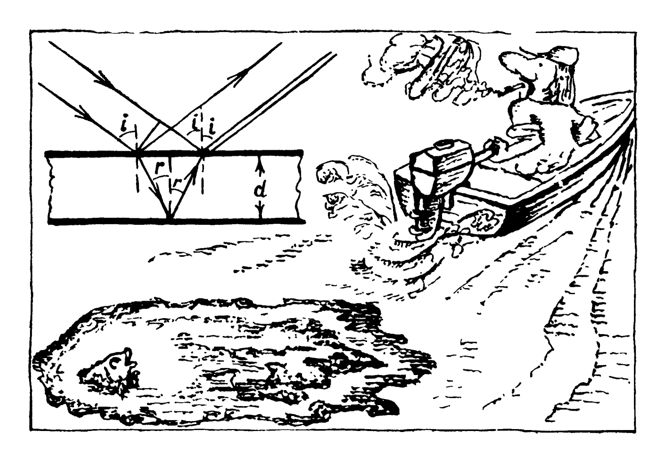


Fig. 2.5

deux les rayons lumineux et pour créer une différence de marche entre les parties de ces rayons.

Etudions de plus près les interférences des rayons lumineux résultant des réflexions d'un rayon incident initial sur les faces extérieure et intérieure d'une lame ou d'une pellicule transparente. Ce phénomène d'interférences par les lames minces est important, d'une part, en raison de ses applications pratiques et, d'autre part, parce qu'il se réalise dans la Nature. En outre, l'étude de ce cas particulier permettra d'expliquer plusieurs notions importantes que l'on utilise pour décrire les ondes lumineuses et les autres ondes électromagnétiques.

A l'aide de la figure 2.5 le calcul de la différence de phase entre les deux rayons est facile à faire. La différence de phase dépend de la différence de marche, i.e. de la différence des longueurs des trajets parcourus par les deux

rayons. D'après le schéma, la différence de marche $x = 2d \cos r$. Il s'agit maintenant de passer de la différence de marche à la différence de phase dont dépend le résultat de la superposition des ondes: amplification ou extinction.

On s'adressera maintenant aux lecteurs que la formule du cosinus ne refute pas. La vibration du vecteur lumineux en tout point de l'espace peut être représentée par l'expression $A \cos 2\pi\nu t$. Un déphasage d'un angle φ signifie qu'il faut ajouter cet angle à l'argument du cosinus. Pour comparer les phases d'une onde en des points distants de x, on doit déterminer le nombre de longueurs d'onde que contient la distance x et multiplier le résultat obtenu par 2π. La quantité ainsi obtenue est le déphasage: $\varphi = 2\pi x/\lambda$.

Revenons à la question des interférences des rayons dans une lame transparente. Nous connaissons déjà la différence de marche des rayons; il nous reste à la diviser par λ. Mais d'où savons-nous que la longueur d'onde de la lumière est la même dans le vide et dans la lame transparente? Bien au contraire, nous avons de bonnes raisons de penser que l'onde doit subir des modifications lorsqu'elle passe d'un milieu dans un autre. On connaît le phénomène de dispersion: les photons de différentes couleurs se comportent différemment. La fréquence, la longueur d'onde et la vitesse de propagation de l'onde sont liées par l'égalité $c = \nu\lambda$. Quelles sont les grandeurs qui varient lorsque l'onde pénètre dans un nouveau milieu? Pour répondre à cette question on doit recourir à l'expérience. On peut mesurer directement la vitesse de propagation de l'onde dans le corps considéré et s'assurer que l'indice de réfraction qui détermine le changement de la direction de propagation des ondes tombant sous incidence oblique sur la surface de séparation

de deux milieux est égal au rapport des vitesses de propagation de la lumière dans les deux milieux considérés. Pour le cas où l'un des milieux est l'air (plus exactement le vide), on a

$$n = c/v,$$

où c désigne la vitesse de la lumière dans le vide et v est sa vitesse dans le milieu. Il nous reste à déterminer si c'est la fréquence ou la longueur d'onde qui change lorsque la lumière passe de l'air dans le milieu. Pour pouvoir interpréter les résultats des expériences d'interférences, on doit admettre que la fréquence des photons reste constante et que c'est la longueur d'onde qui varie. Par conséquent, on peut exprimer l'indice de réfraction par la formule

$$n = \lambda_0/\lambda,$$

où λ_0 est la longueur d'onde dans le vide.

On dispose maintenant de tout ce qu'il faut pour écrire l'expression de la différence de phase entre les rayons sortant de la lame. Comme l'un des rayons se propage dans l'air et l'autre dans le verre, la différence de phase est

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} nx = \frac{4\pi}{\lambda_0} nd \cos r.$$

Cette formule montre ce que l'on peut mesurer dans une étude des interférences lumineuses dans les lames. Si on connaît l'épaisseur de la lame, on peut calculer l'indice de réfraction du matériau de la lame et si on connaît la valeur de n, on peut déterminer avec une précision très grande l'épaisseur de la lame. On peut encore déterminer les longueurs des ondes de différentes « couleurs ».

Dans le cas d'une lame d'épaisseur variable, faite en un matériau homogène, et si l'angle d'incidence du faisceau est pratiquement le même dans toute la région d'incidence, les interférences se manifestent sous forme de franges d'égale épaisseur. Avec une lame présentant des défauts de planéité, on obtient un système de franges brillantes et noires (ou irisés en lumière blanche, puisque les photons de différentes couleurs se comportent différemment), qui décèlent les régions d'égale épaisseur. C'est ce qui explique l'irisation que l'on observe sur les pellicules d'essence ou d'huile flottant à la surface de l'eau.

On observe de très jolies franges d'égale épaisseur sur une pellicule de savon. On commence par fabriquer un petit cadre en fil métallique que l'on immerge dans de l'eau savonnée ; lorsqu'on retire le cadre de l'eau, on voit qu'il est recouvert d'une pellicule dont l'épaisseur augmente dans le sens d'écoulement du savon (de haut en bas). On distingue alors sur la pellicule des franges horizontales colorées.

Les méthodes interférentielles sont largement utilisées pour la mesure de petites distances ou de petites variations de distance. Elles permettent de déceler les variations d'épaisseur inférieures à quelques centièmes de la longueur d'onde de la lumière. Dans les mesures interférométriques des rugosités des surfaces cristallines, on arrive à une précision de l'ordre de 10^{-7} cm.

Ces procédés sont largement utilisés dans l'industrie des instruments d'optique. Par exemple, le contrôle de la qualité des surfaces des lames de verre est réalisé par observation des franges d'égale épaisseur d'un coin d'air formé par la lame à contrôler et une surface étalon ; ces surfaces sont en contact mutuel suivant un

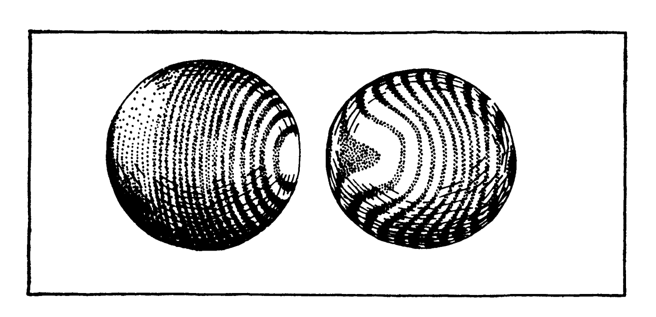


Fig. 2.6

bord. Si les deux surfaces en regard sont partout planes, les franges d'égale épaisseur seront des lignes parallèles.

Supposons que la lame à contrôler présente une bosse ou un creux. Les franges d'égale épaisseur se déforment pour contourner le défaut. Lorsqu'on fait varier l'angle d'incidence de la lumière, les franges se déplacent dans un sens ou dans l'autre suivant que le défaut est une bosse ou un creux. La figure 2.6 représente le champ de vision d'un microscope lorsqu'on observe ces deux types de défaut. Sur la première figure, le défaut se trouve près du bord à droite et sur l'autre figure, le défaut se trouve à gauche.

A l'aide des réfractomètres interférentiels, on peut mesurer les indices de réfraction des substances avec une très grande précision. Dans ces appareils, on observe les interférences de deux rayons qui ont été largement séparés l'un de l'autre.

On interpose un corps de longueur l et d'indice de réfraction n sur le trajet de l'un des rayons. En notant n_0 l'indice de réfraction du milieu, la variation de la différence de marche optique est alors $\Delta = l\,(n - n_0)$. On superpose les deux

rayons à l'aide d'une lentille convergente. Quelles figures observera-t-on dans la lunette d'observation ? On y verra un système de franges brillantes et obscures, mais ce ne sont plus des franges d'égale épaisseur que l'on peut voir à l'œil nu. Le système de franges qui se forme dans le réfractomètre a une origine différente ; le faisceau incident n'étant pas parfaitement parallèle (il est légèrement divergent), les rayons tombent sur la lame avec des angles légèrement différents.

Les rayons d'égale inclinaison interféreront de la même façon et se rassembleront en un même endroit du plan focal de la lunette d'observation. Si on fait varier la différence de marche entre les parties du faisceau initial, les franges se mettront en mouvement. Lorsque la différence de marche varie de Δ, Δ/λ franges défilent devant l'oculaire de la lunette.

La précision des mesures de réfractométrie interférentielle est très bonne, puisqu'on arrive à déceler sans difficulté un déplacement de 0,1 de frange. Pour un tel déplacement, $\Delta = 0{,}1\lambda = 0{,}5 \cdot 10^{-5}$ cm, ce qui pour un échantillon de longueur $l = 10$ cm permet de fixer une variation de l'indice de réfraction égale à $0{,}5 \cdot 10^{-6}$.

Il convient de parler maintenant d'un autre type d'interféromètre qui ne fait pas appel à la réfraction des rayons. Il s'agit de l'interféromètre qui a été réalisé par le physicien américain Albert Michelson (1852-1931). Cet interféromètre joua un rôle exceptionnel dans l'histoire de la Physique (et même dans l'histoire de la pensée humaine). C'est à l'aide de cet interféromètre que fut établi un fait d'une importance exceptionnelle : la vitesse de la lumière est la même suivant les directions parallèles et perpendiculaires à l'orbite terrestre. Cela signifie

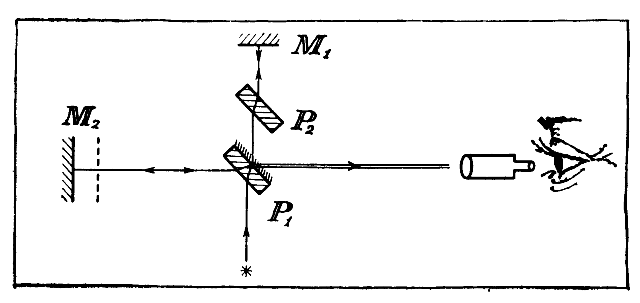


Fig. 2.7

que la vitesse de la lumière ne se compose pas avec la vitesse de la lampe flash produisant des éclairs lumineux, selon les règles d'addition valables pour la composition de la vitesse d'une balle avec la vitesse de déplacement du tireur au fusil. La découverte de ce résultat important fut le point de départ de l'élaboration de la théorie de la relativité et d'une révision du contenu des notions scientifiques fondamentales telles que la longueur, le temps, la masse, l'énergie. Mais on en parlera plus loin ; ici il s'agit de l'interféromètre de Michelson dont l'importance n'est pas seulement historique ; les principes simples qui sont à la base de sa construction sont mis à profit jusqu'à présent pour la mesure des longueurs et des distances.

Dans cet interféromètre, un pinceau cylindrique de lumière monochrome tombe sur la lame à faces parallèles P_1 (fig. 2.7) recouverte sur la face portant les traits par une couche d'argent semi-transparente. Cette lame est placée à 45° par rapport au rayon incident envoyé par la source lumineuse; elle divise le rayon incident en deux rayons dont l'un se propage parallèlement au rayon initial (en allant vers le miroir M_1) et l'autre se propage dans une direction

rectangulaire (vers le miroir M_2). Les rayons tombent sur les miroirs sous incidence normale et retournent exactement aux mêmes endroits de la lame semi-transparente dont ils sont issus. Chacun des rayons réfléchi par le miroir se divise une nouvelle fois en deux sur la lame. Une partie de la lumière retourne à la source et l'autre partie pénètre dans la lunette d'observation. La figure 2.7 permet de constater que le rayon lumineux venant du miroir qui fait face à la lunette, traverse trois fois de suite la lame semi-argentée. En conséquence, pour réaliser l'égalité des chemins optiques, on fait passer le rayon venant du miroir M_1 à travers une lame de compensation P_2, qui est identique à la lame P_1, mais sans être semi-argentée.

On observe dans le champ de vision de la lunette des anneaux qui sont les franges produites par les interférences d'un pinceau conique de rayons primaires dans une lame d'air (d'épaisseur égale à la différence des distances séparant les miroirs de l'endroit où les rayons sont divisés). Le déplacement de l'un des miroirs (par exemple du miroir M_2 dans la position indiquée en pointillé) d'un quart de longueur d'onde correspond au passage d'un maximum à un minimum du système de franges d'une distance égale à la moitié de l'épaisseur d'un anneau. Un tel déplacement est parfaitement perceptible. Cela signifie qu'avec des rayons violets la sensibilité de l'interféromètre est supérieure à 100 nm.

L'apparition des lasers révolutionna les techniques interférométriques et ce pour les raisons suivantes.

La durée de rayonnement d'un atome est de 10^{-8} à 10^{-9} s. Un acte de rayonnement consiste en l'émission d'un train d'ondes; comme la

durée d'émission est très courte, malgré la grande vitesse de propagation de la lumière, la longueur du train d'ondes est très petite. Lorsque nous divisons un rayon en plusieurs parties, seules les deux parties d'un même train d'ondes sont susceptibles d'interférer ; cela signifie qu'un segment de sinusoïde doit se superposer notablement à un autre segment. Or cela n'est possible que si la différence de marche entre les parties d'un même rayon est beaucoup plus petite que la longueur du train d'ondes.

La plus grande différence de marche entre les rayons permettant d'observer encore une figure d'interférences est appelée longueur de cohérence. Pour la lumière visible, cette longueur est égale à quelques fractions de millimètre.

La situation change complètement dès qu'on fait appel à un rayonnement laser. Un laser à émission continue génère des photons de rayonnement stimulé qui, tous, possèdent au départ la même phase. En termes de la théorie ondulatoire, cela signifie que les trains d'ondes émis par des atomes différents se superposent les uns aux autres pour former une onde unique. La longueur de cohérence est dans ce cas pratiquement illimitée ou tout au moins on la mesure en mètres ou en kilomètres (l'idéal est comme toujours irréalisable, mais on n'examinera pas les facteurs qui limitent la longueur de cohérence).

L'utilisation de la lumière laser permet de réaliser des interféromètres permettant de s'attaquer à des problèmes qui semblaient insolubles à l'époque pré-laser. Ainsi, par exemple, avec une source de lumière ordinaire, on ne peut déplacer le miroir de l'interféromètre de Michelson que d'une longueur de l'ordre du millimètre. Mais si on utilise un rayon laser, le chemin parcouru par le rayon tombant sur le miroir M_1

peut être égal à quelques centimètres et celui du rayon réfléchi par M_2 à plusieurs dizaines de mètres.

Les interféromètres à lumière laser servant au contrôle du degré de sphéricité des lentilles n'utilisent qu'une seule surface étalon, tandis qu'avec une lumière ordinaire, on devait disposer d'une surface étalon pour chaque dimension des lentilles (puisqu'on ne peut alors travailler avec de grandes différences de marche des rayons). Par ailleurs, les figures d'interférence obtenues avec les lasers sont beaucoup plus nettes et se laissent analyser plus simplement.

Comme il est superflu d'introduire des compensateurs de chemin optique pour l'un des rayons, les interféromètres acquièrent de nouvelles potentialités d'application. Ils peuvent assurer le contrôle du mouvement des barrages, des dérives géologiques, des oscillations de l'écorce terrestre. Pour déterminer les vitesses de ces différents mouvements, on fait réfléchir un rayon laser sur l'objet étudié se trouvant à grande distance de la source lumineuse, et on provoque les interférences du rayon réfléchi avec le rayon initial.

INSTRUMENTS À LASER

L'équipement qui produit le rayon laser peut être appelé instrument, puisqu'il sert à l'analyse, au contrôle et à l'observation. Le laser trouve dans l'industrie beaucoup plus d'applications que les autres instruments d'optique. Les lasers trouvent tellement d'applications qu'on sera souvent obligé d'y revenir. Dans ce paragraphe nous ne considérerons que les applications des lasers à l'usinage des matériaux. Lorsque la puissance requise n'est pas grande, on peut utili-

ser les lasers au néodyme dont l'encombrement est faible. Il a été déjà dit que le corps de travail de ce laser est une tige de verre dopé au néodyme, de 4 mm de diamètre et de 50 mm de longueur. L'impulsion lumineuse qui sert au pompage est produite par une lampe au xénon. Pour réduire les pertes d'énergie lumineuse, la lampe et la tige sont enfermées dans une chambre cylindrique refroidie par circulation d'eau.

Pour les différentes applications de cet instrument, ainsi que des instruments analogues, les potentialités suivantes importent: localisation de l'énergie sur une aire extrêmement petite, dosage précis des portions d'énergie, transmission d'énergie sans aucun support — fils ou contacts.

Les utilisations des lasers dans l'industrie horlogère sont à ce point de vue caractéristiques. Le lecteur sait bien que les montres sont montées sur rubis et même s'il ignore à quoi ils servent, il sait que leur nombre caractérise la qualité d'une montre. Or, dans les rondelles en rubis, on doit percer des trous. Avant la mise en œuvre des lasers cette opération demandait plusieurs minutes pour chaque rubis, tandis qu'avec les lasers, ce processus est automatisé et dure moins d'une seconde. Comme l'industrie horlogère consomme plusieurs millions de rubis par an, on conçoit l'économie réalisée par la mise en œuvre du laser.

Dans l'industrie du diamant, le laser sert aux mêmes fins. Dans la fabrication des diamants pour le forage et le tréfilage, le laser sert à conférer à une pierre n'importe quel profil et à forer des ouvertures dont le diamètre peut descendre jusqu'à quelques μm.

Reprenons la question des lasers dans l'industrie horlogère. On a adopté le laser pour

souder les ressorts du mécanisme. Il est bien évident qu'à l'aide du rayon laser on peut réaliser des soudages par points dans toutes les autres industries (ce qui est fréquent dans les techniques modernes). Un avantage incontestable du rayon laser est que son utilisation élimine la nécessité de protéger et de refroidir les parties voisines du point de soudure.

L'utilisation des lasers pour le découpage de n'importe quels matériaux est aujourd'hui chose courante.

Signalons une application inattendue du laser : la restauration des sculptures de marbre. Au XXe siècle, l'atmosphère est, hélas, fortement polluée. Sous l'action des gaz nocifs, en premier lieu de l'oxyde de soufre, contenus dans l'air, le marbre se recouvre d'une pellicule noire. Comme cette pellicule est poreuse, elle s'imprègne d'humidité et de substances nocives. L'enlèvement de cette pellicule par des procédés mécaniques et chimiques peut détériorer la sculpture. Le rayonnement laser pulsé permet d'enlever cette pellicule sans attaquer le marbre.

A l'aide de lasers au CO_2, on réalise la croissance de cristaux sans emploi de creusets. Ce procédé est connu puisqu'on utilise depuis longtemps le chauffage par les courants de haute fréquence ; mais ce procédé de chauffage ne convient pas lorsqu'il s'agit de diélectriques dont la conductibilité thermique est trop petite. A l'aide de lasers on réalise la croissance de cristaux de niobates et d'autres substances sans avoir à utiliser des creusets. L'élimination des creusets est essentielle pour obtenir des cristaux pour la microélectronique où la présence de traces d'impuretés est inadmissible. Or on ne peut empêcher que des atomes « étrangers » provenant du creuset ne s'incorporent au cristal.

On s'abstiendra de décrire l'équipement correspondant ; il a déjà été question de la croissance des cristaux dans le livre 2. Tout comme les courants de haute fréquence, le rayon laser permet de créer une zone fondue dont le déplacement à petite vitesse permet de transformer la charge initiale en un monocristal. L'auteur estime que ce procédé deviendra prépondérant dans un proche avenir.

PHOTOMÉTRIE

On peut caractériser les sources lumineuses par l'énergie qu'elles rayonnent, mais dans nombre de cas seule importe la partie du flux d'énergie qui détermine les impressions visuelles. Ne sont productives d'impressions visuelles que les ondes électromagnétiques d'une longueur d'onde comprise entre 380 et 780 nm.

La lumière que perçoit le cerveau se caractérise par sa luminance et par sa couleur. Si on compare les sensations lumineuses déterminées par des rayonnements de mêmes intensités mais de longueurs d'onde différentes, on constate que c'est la source qui émet des radiations jaune verdâtre d'une longueur d'onde égale à 555 nm qui possède la meilleure luminosité.

On caractérise l'efficacité lumineuse par la courbe de visibilité de l'œil humain (fig. 2.8) qui représente (en unités relatives) la sensibilité de l'œil normal aux radiations de différentes longueurs d'onde. Or les techniciens négligent généralement la courbe de visibilité et préfèrent déterminer à l'œil l'intensité lumineuse intégrale. On doit alors faire choix d'une source de lumière étalon à laquelle on comparera toutes les sources lumineuses. Pendant longtemps l'unité d'intensité lumineuse était appelée bougie, car

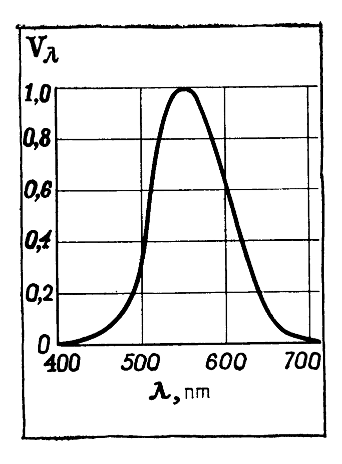


Fig. 2.8

les premières tentatives de créer un étalon consistaient à fixer une flamme de bougie standard. On conçoit que ce n'était pas facile à faire.

L'étalon international de source lumineuse est aujourd'hui un corps noir incandescent, en platine. Le corps noir émet la lumière rayonnée par le platine chauffé à la température de fusion (2046 K) à travers une petite ouverture.

L'unité d'intensité lumineuse est la candela (bougie en latin). La définition internationale de la candela s'efforce de ne pas fixer nommément la température de la source (pour ne pas introduire d'erreurs dues à la mesure des températures). On définit la candela de la façon suivante. La candela est l'intensité lumineuse, dans la direction perpendiculaire, d'une surface de 1/600 000 mètre carré d'un corps noir à la température de congélation du platine sous la pression atmosphérique normale.

A grande distance, toute source lumineuse paraît ponctuelle. C'est dans ces conditions qu'il est commode de mesurer l'intensité lumineuse

d'une source. Construisons une sphère autour d'une source ponctuelle et délimitons une surface d'aire S. En divisant S par le carré de la distance au centre, on définit l'angle solide. L'unité d'angle solide est le stéradian. C'est l'angle solide qui, ayant son sommet au centre d'une sphère, découpe, sur la surface de cette sphère, une aire équivalente de celle d'un carré dont le côté est égal au rayon de la sphère.

On appelle flux lumineux le produit de l'intensité lumineuse d'une source ponctuelle par l'angle solide.

On ne doit pas se soucier de ce que le flux lumineux est égal à zéro pour un faisceau de rayons parallèles, car dans ce cas on n'utilise pas la notion de flux lumineux.

L'unité de flux lumineux, appelée lumen, est le flux lumineux émis dans un angle solide de 1 stéradian par une source ponctuelle uniforme placée au sommet de l'angle solide et ayant une intensité lumineuse de 1 candela. Le flux lumineux total rayonné par une source ponctuelle dans toutes les directions est égal à 4π lm.

L'intensité lumineuse caractérise les sources lumineuses indépendamment de l'étendue de leur surface. Il est évident que l'effet visuel dépend de l'étendue de la source. C'est pour cela qu'on les caractérise par la luminance. La luminance est l'intensité lumineuse rapportée à l'unité de surface de la source ; l'unité de luminance, appelée stilb, est la candela par centimètre carré.

Une seule et même source de lumière enverra une énergie lumineuse différente sur la page du livre que vous lisez en fonction de la distance à laquelle elle se trouve. Ce qui importe pour le lecteur, c'est l'éclairement de la partie de sa table de travail où se trouve le livre. Si l'étendue de la source est petite (source ponctuelle),

l'éclairement d'une surface sera égal au quotient de l'intensité de la source par le carré de sa distance à la source. Pourquoi doit-on diviser par le carré de la distance? Parce que le flux lumineux, rayonné dans un angle solide donné, est constant, quelle que soit la distance du point considéré à la source ; or l'aire de la sphère et de la surface sphérique, qui est vue sous l'angle solide, croissent en raison inverse du carré de la distance. Cette règle simple est appelée loi des carrés inverses. Lorsqu'on fait varier la distance du livre à la source de 1 à 10 m, l'éclairement de la page diminue de 100 fois.

L'unité d'éclairement est le lux. C'est l'éclairement qui reçoit, d'une manière uniformément répartie, un flux lumineux de 1 lumen par mètre carré.

Par une nuit sans lune, l'éclairement est de 0,0003 lx. Lorsqu'on dit qu'on n'y voit pas le bout de son nez, nous définissons l'éclairement du bout du nez. Pendant la pleine lune, l'éclairement est de 0,2 lx. Pour pouvoir lire sans fatigue, il faut un éclairement de 30 lx. Pendant le tournage d'un film de cinéma, à l'aide de projecteurs on porte l'éclairement à 10 000 lx.

On n'a rien dit encore des instruments servant à la mesure du flux lumineux et des éclairements. De nos jours ces mesures ne posent aucun problème. On procède pratiquement comme on devrait le faire si on donnait une nouvelle définition de la candela. On mesure l'énergie tombant sur une cellule photoélectrique qui est graduée en lux, compte tenu de la courbe de visibilité.

Les photomètres qui étaient en usage au siècle dernier avaient pour principe de base la comparaison des luminances de deux surfaces contiguës éclairées par deux sources lumineuses. Il

fallait mesurer l'intensité de la lumière qui tombait sur l'une de ces surfaces. A l'aide de dispositifs simples, on réduisait le flux lumineux d'autant de fois qu'il le fallait pour que l'éclairement des deux surfaces devienne égal.

L'HOLOGRAPHIE

La création des lasers marque le début d'une nouvelle époque de développement des sciences et des techniques. Il est difficile de trouver un domaine scientifique où le rayonnement stimulé n'ait pas favorisé la naissance de nouvelles voies de développement.

En 1947, D. Gabor suggéra l'idée d'utiliser une lumière cohérente pour former des images des objets par un nouveau procédé. La nouvelle technique, que l'on désigne sous le nom d'holographie, se distingue radicalement de la photographie. L'holographie ne devient possible que parce que le rayonnement stimulé possède des propriétés différentes de celles de la lumière ordinaire. Rappelons une nouvelle fois que dans le cas d'un rayonnement laser, presque tous les photons possèdent les mêmes fréquence, phase, polarisation et direction de propagation. Comme les rayons laser ne divergent que très peu, on peut produire des rayons très fins à grande distance de la source. Les rayons laser se caractérisent par une très grande longueur de cohérence (longueur du train d'ondes). C'est cette circonstance qui importe pour l'holographie et permet d'assurer les interférences des rayons divisés présentant une grande différence de marche.

Le schéma dans la partie supérieure de la figure 2.9 aide à comprendre la technique de production des hologrammes. L'objet observé est éclairé par un rayonnement laser de grande lar-

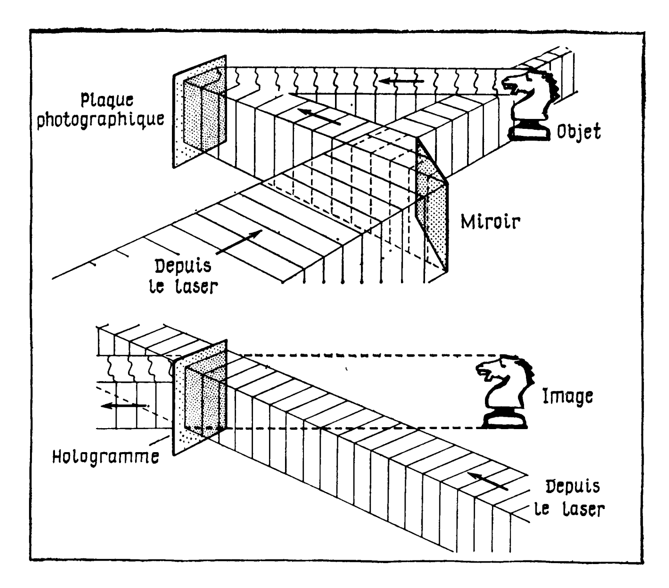


Fig. 2.9

geur mais de puissance faible (pour ne pas détériorer l'objet). Un seul et même rayon est diffusé par l'objet et est réfléchi par un miroir pour créer ce qu'on appelle une onde de référence. Les deux ondes se superposent et la figure d'interférences qui en résulte est enregistrée sur une plaque photographique.

Sur la figure 2.10 on voit en haut l'objet et au-dessous son « image ». Cette combinaison compliquée d'anneaux brillants et sombres, appelée hologramme, est bien l'image de l'objet, mais c'est une image codée. L'hologramme contient toutes les informations concernant l'objet, c'est-à-dire toutes les informations concernant l'onde électromagnétique diffusée par les pièces d'échecs.



Fig. 2.10

Une photographie ne contient jamais autant d'information. La meilleure photographie ne fournit que des informations sur les intensités des rayons diffusés. Or l'onde qui est diffusée par n'importe quel point de l'objet ne peut être complètement définie que si on indique, en plus de son intensité (amplitude), sa phase. L'hologramme c'est une figure d'interférences dont chaque frange brillante ou obscure porte des informations concernant l'intensité et la phase des

rayons venant de l'objet en des endroits convenables de la plaque photographique.

On soumet les hologrammes exactement comme les plaques photographiques aux opérations de développement et de fixage, après quoi on peut les conserver pendant un temps indéfiniment long. Lorsqu'on aura envie de regarder la reproduction de l'objet, on n'aura qu'à envoyer sur l'hologramme le même faisceau laser que celui utilisé pour la prise de vue, tout en veillant à ce que la disposition géométrique soit la même : le rayon laser doit être orienté dans le sens du rayon réfléchi par le miroir (fig. 2.9, en bas). Là où se trouvait l'objet apparaîtra son image qui, dans le cas idéal, sera identique à ce que fixa l'œil.

Nous ne pouvons aborder ici la théorie de formation des hologrammes ; l'idée qui préside à ce processus consiste en ce que l'éclairement de l'hologramme donne lieu à l'apparition d'ondes diffusées ayant les mêmes amplitudes et les mêmes phases que celles qui ont produit l'hologramme. Ces ondes se superposent pour former un front d'onde identique à celui qui créa l'hologramme. Cette reconstitution de l'onde n'a lieu que si on éclaire l'hologramme dans les mêmes conditions que lors de la prise de vue. Dans ces conditions, on obtient une image de l'objet.

Les recherches sur l'holographie se poursuivent. Aujourd'hui, on arrive à produire des images en couleurs. On peut améliorer la qualité des images en enregistrant plusieurs hologrammes d'un même objet de plusieurs positions. Enfin (et c'est le plus intéressant) on a trouvé qu'il était possible d'examiner les images holographiques sans avoir recours à un rayonnement laser.

Il existe plusieurs ouvrages spécialisés consacrés à tous les aspects de l'holographie. L'holographie mérite l'attention qu'on lui accorde parce que c'est un moyen extrêmement compact d'enregistrement d'informations tridimensionnelles concernant les objets les plus divers. Les recherches ne sont pas encore achevées et seul l'avenir dira quel rôle pourra jouer l'holographie dans la vie courante et dans les techniques modernes.

CHAPITRE 3

RAYONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE DUR

DÉCOUVERTE DES RAYONS X

On appelle rayons X les radiations dont la longueur d'onde est comprise entre quelques dizaines et quelques centièmes de nanomètre. Les radiations de longueurs d'onde encore plus courtes constituent les rayons gamma.

On a déjà noté que les dénominations des différentes parties du spectre électromagnétique étaient affaire de convention. On utilise les différents termes non pas d'après la longueur d'onde, mais d'après la source de rayonnement. C'est ainsi que le terme « rayons X » est appliqué au rayonnement qui est émis lorsqu'un flux d'électrons tombe sur un obstacle.

Ce type de rayonnement fut découvert le 8 novembre 1895 par Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923). A cette époque, de nombreux physiciens étudiaient les flux d'électrons générés dans des ballons de verre évacués (plusieurs de ces ballons ont été présentés sur la figure 2.6 dans le livre 3). Deux électrodes étaient soudées dans les ballons et on leur appliquait une tension élevée. Depuis longtemps on soupçonnait que des rayons non identifiés émanaient de la cathode ; tout au début du XIXe siècle, plusieurs expérimentateurs avaient observés des éclats lumineux dans les tubes et une luminescence du verre du ballon. Les expériences de Wilhelm Hittorf (1844-1914) et de William Crookes (1832-1919) démontrèrent de façon indubitable qu'il

s'agissait bien de rayons. Tous les manuels scolaires reproduisirent la photographie du tube de Crookes avec la croix (Crookes réalisa ce tube en 1879, dix ans après Hittorf). La croix formait une ombre bien nette sur le verre. Cette expérience élégante apportait la preuve que la cathode émettait des rayons inconnus qui se propageaient rectilignement. Lorsque ces rayons tombaient sur le verre, celui-ci émettait une lueur ; une mince pellicule métallique absorbait ces rayons.

J. J. Thomson démontra, en 1897, que les rayons cathodiques étaient en réalité un flux d'électrons. Par un procédé qui a été décrit dans le livre 3 J. J. Thomson réussit à déterminer la valeur du rapport de la charge à la masse de l'électron. Au cours des 10-15 années qui suivirent, on arriva à la conclusion que l'électron était la plus petite portion d'électricité.

Mais arrêtons cette révision et revenons à la découverte de Röntgen. Pourtant, cette petite révision a permis de préciser que la découverte de Röntgen précéda l'élucidation de la nature des rayons issus de la cathode. D'ailleurs c'est précisément à cause de cette incertitude sur la nature des rayons que Röntgen utilisait des tubes qui se distinguaient les uns des autres par la disposition des électrodes et par la forme des ballons de verre.

On connaît les moindres détails des événements qui se déroulèrent au soir du 8 novembre 1895. Röntgen recouvrit le tube d'un tissu noir, éteignit la lumière et s'apprêtait à quitter le laboratoire en oubliant de couper le courant alimentant le tube. Jetant un coup d'œil sur son installation, Röntgen remarqua que l'écran en cyanure de baryum, qui était susceptible de luminescence, et qui se trouvait à côté du tube, était luminescent. Röntgen revint sur ses pas

et débrancha l'appareil, la luminescence disparut. Il savait bien que la construction du tube était telle que les rayons cathodiques ne pouvaient pas traverser la housse et après cela une forte couche d'air. Cela signifiait qu'il était en présence d'un rayonnement encore inconnu.

Ce n'est qu'à la fin de l'année que Röntgen fit sa première communication sur sa découverte. Entre temps, il réussit à étudier les nouveaux rayons assez complètement pour que personne ne put en rajouter jusqu'à la découverte (en 1912) de la diffraction des rayons X. C'est Röntgen lui-même qui appela rayons X les rayons qu'il découvrit.

La propriété la plus frappante des rayons X et qui fut mise en évidence en premier lieu par Röntgen, est leur aptitude à passer à travers des substances qui sont opaques pour la lumière visible. (La figure 3.1 rappelle les caricatures qui parurent dans les journaux 2-3 mois après les premières publications de Röntgen.)

Le pouvoir de pénétration des rayons X rend des services inestimables à la médecine et permet aussi de déceler les défauts dans les pièces industrielles. Les excellents résultats de la radiographie sont une conséquence de ce que les substances de densités différentes absorbent inégalement les rayons X. Plus les atomes de la substance sont légers, moins ils absorbent les rayons X.

On constata assez tôt que la profondeur de pénétration des rayons X croît à mesure qu'augmente la tension appliquée au tube. Les tensions que l'on utilise en radiographie sont comprises entre plusieurs dizaines et plusieurs centaines de kilovolts.

Après étude des propriétés des rayons X, les chercheurs établirent que leur production résulte du freinage des électrons par un obstacle. Il est

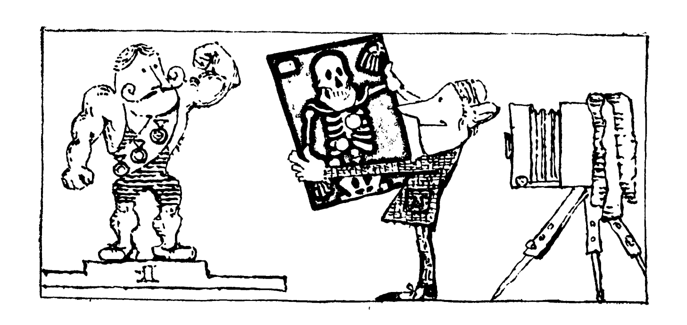


Fig. 3.1

curieux de noter que pendant longtemps les tubes à rayons X comportaient trois électrodes. A la cathode faisait face une anticathode que venaient frapper les électrons émis par la cathode. L'anode était disposée de côté. Au bout d'un certain temps, on comprit que c'était là une complication inutile, et depuis les tubes à rayons X ne comportent que deux électrodes. Les électrons sont freinés dans l'anode dont la surface se présente de biais par rapport à la direction du flux d'électrons, afin que le faisceau de rayons X soit émis dans la direction convenable. Si la surface de l'anode était frappée par les électrons à angle droit, les rayons X seront émis dans toutes les directions et l'intensité utile sera notablement réduite.

La radioscopie réalisa une véritable révolution en médecine et trouva de nombreuses applications industrielles. Les techniques radioscopiques modernes sont actuellement bien au point. En modifiant la position de l'objet étudié par rapport à la position du tube à rayons X, on peut obtenir plusieurs images à l'aide desquelles on arrive non seulement à déterminer la position

du défaut en projection, mais encore à déterminer la profondeur à laquelle il se trouve.

Suivant la nature des matériaux soumis au contrôle, on utilise tantôt un rayonnement très pénétrant (dur), tantôt un rayonnement très mou, le principal objectif étant d'obtenir une image bien contrastée, afin de voir le défaut dont la densité peut être peu différente de celle du matériau environnant.

La loi de l'absorption des rayons X, tout comme la loi de l'absorption de tout autre rayonnement, est presque évidente. On veut connaître la variation d'intensité du rayon après traversée d'une plaque d'épaisseur d (rappelons que l'intensité, c'est l'énergie rapportée à l'unité de temps et à l'unité de surface). Comme ce livre est destiné aux lecteurs ne connaissant pas le calcul intégral, on n'énoncera la loi de l'absorption que pour le cas de la traversée de plaques de faible épaisseur. On dira que l'épaisseur est petite si l'intensité du rayon transmis n'aura diminué que de peu, disons de 1 %. Dans ce cas, la loi de l'absorption est particulièrement simple: la portion de rayonnement absorbée est proportionnelle à l'épaisseur de la plaque. Si l'intensité a diminué en passant de la valeur I_0 à la valeur I, cette règle s'exprime par la relation

$$\frac{I-I_0}{I}=\mu d.$$

Le coefficient de proportionnalité μ est le coefficient d'absorption.

L'auteur se plaît à poser une question simple aux étudiants: en quelles unités mesure-t-on le coefficient d'absorption? On trouve facilement la réponse. Il tombe sous le sens que les deux membres de l'égalité ci-dessus doivent avoir les mêmes unités de mesure (on ne peut comparer

10 kg et 5 m). On ne peut comparer que des ampères aux ampères, des kilogrammes aux kilogrammes et des ergs aux ergs. Dans toute égalité, on doit trouver à droite et à gauche des nombres exprimés en mêmes unités de mesure.

Or, dans le membre de gauche de notre égalité, on trouve une quantité sans dimension. Lorsqu'on dit que la fraction de rayonnement absorbé est égal à 1/30 ou à 0,08, il n'y a rien à ajouter. Les unités de mesure s'éliminent lorsqu'on divise une intensité par une autre intensité. Mais dans ce cas, dans le second membre doit figurer une autre quantité sans dimension. Comme on mesure les épaisseurs en centimètres (ou en d'autres unités de longueur), le coefficient d'absorption doit s'exprimer en cm^{-1}.

Supposons que le rayonnement traverse une plaque de 10 cm d'épaisseur en ne perdant que 1 % de son intensité. Le premier membre de l'égalité vaut 1/100 et le coefficient d'absorption est donc égal à 0,001 cm^{-1}. Dans le cas d'un rayonnement mou, qui perd 1 % de son énergie après traversée d'une feuille métallique de 1 μm d'épaisseur (0,0001 cm), le coefficient d'absorption est égal à 100 cm^{-1}.

Les physiciens ne disposent pas d'une bonne théorie qui permettrait d'établir la formule du coefficient d'absorption. On a établi que le coefficient d'absorption était approximativement proportionnel au cube de la longueur d'onde du rayonnement X et au cube du nombre atomique de la substance traversée par le rayonnement.

Comme les longueurs d'onde des rayons X sont fort petites, les fréquences des vibrations électromagnétiques sont grandes. Il s'ensuit que le quantum $h\nu$ de rayons X transporte une grande énergie. Cette énergie suffit non seulement pour déterminer l'évolution des réactions chimiques

qui provoquent le noircissement des émulsions photographiques ou la fluorescence des écrans phosphorescents (ce que peuvent faire les rayons lumineux), mais encore pour faire éclater les molécules. Autrement dit, les rayons X ionisent l'air et les autres milieux qu'ils traversent.

Quelques brèves remarques concernant les rayons gamma. On utilise ce terme pour désigner le rayonnement de courte longueur d'onde qui apparaît lors de la désintégration radioactive. Disons tout de suite que les rayons gamma sont émis par les substances naturellement radioactives, ainsi que par les éléments produits artificiellement. Il est bien évident qu'un rayonnement gamma existe dans les réacteurs nucléaires. L'explosion des bombes atomiques s'accompagne de l'émission de rayons gamma très durs et de très forte intensité.

Comme les rayons gamma peuvent avoir une très petite longueur d'onde, leur coefficient d'absorption peut être très petit. Ainsi, par exemple, les rayons gamma qui sont émis lors de la désintégration du cobalt radioactif, sont capables de traverser plusieurs dizaines de centimètres d'acier.

Les rayonnements électromagnétiques de très courtes longueurs d'onde et susceptibles de briser les molécules sont très dangereux pour l'organisme humain. C'est pour cela qu'il faut se protéger contre les rayons X et les rayons gamma. Le plus souvent, on utilise pour cela des plaques de plomb. Les murs des salles de radioscopie sont recouverts d'un plâtre spécial contenant des sels de baryum.

On peut utiliser les rayons gamma de la même façon que les rayons X aux fins de radiographie. Dans ce cas on a recours aux rayons gamma émis par les substances radioactives qui sont les

« déchets » du combustible nucléaire. Les rayons gamma sont plus pénétrants que les rayons X et possèdent l'avantage que leur source est très compacte et se présente sous forme d'une ampoule que l'on peut placer dans des endroits inaccessibles aux tubes à rayons X.

LA RADIOCRISTALLOGRAPHIE

En 1912, Röntgen dirigeait la chaire de Physique de l'Université de Munich. Les questions concernant la nature des rayons X y étaient l'objet de nombreux débats. Quoique physicien expérimentateur, Röntgen éprouvait beaucoup de respect pour la théorie ; la chaire de Physique de l'Université de Munich comptait parmi ses membres plusieurs théoriciens de talent qui s'acharnaient à élucider la nature des rayons X.

Tout naturellement, on essaya d'étudier la transmission des rayons X par les réseaux de diffraction. Rappelons au lecteur ce qu'est le réseau de diffraction dont la mise en œuvre permit de démontrer de façon univoque la nature ondulatoire de la lumière et de déterminer de façon précise les longueurs d'ondes des différentes radiations.

Un des procédés utilisés pour fabriquer les réseaux de diffraction consiste à porter, à l'aide d'une machine à diviser spéciale, des traits rigoureusement équidistants sur une lame de verre recouverte d'une couche d'aluminium. Un bon réseau de diffraction doit avoir une petite période (c'est la largeur totale d'une fente et de l'espace opaque contigu) et un grand nombre de traits. On arrive à réaliser des réseaux avec plusieurs centaines de milliers de traits et sur un 1 mm de longueur on dénombre plus de 1000 traits.

En plaçant une lentille devant une intense source ponctuelle, on obtient un faisceau de rayons lumineux parallèles ; lorsque le faisceau tombe à angle droit sur le réseau, les rayons qui sortent de chacune de ses fentes sont dirigés en tous sens (cela signifie que chaque fente devient source d'une onde sphérique). Suivant certaines directions les ondes issues de toutes les fentes sont en phase. Pour que les ondes puissent se renforcer mutuellement, il faut que la différence de marche des rayons soit égale à un multiple entier de la longueur d'onde. Les rayons de grande intensité se propagent suivant des directions définies par un angle α et vérifiant la relation

$$a \sin \alpha = n\lambda,$$

où n est un nombre entier et a la période du réseau. Nous laissons au lecteur le soin de démontrer cette formule.

Le nombre entier n est l'ordre du spectre. Lorsqu'un rayon monochromatique tombe sur le réseau, on obtient dans le plan focal de l'oculaire plusieurs franges brillantes alternant avec des franges sombres. Si la lumière est composée d'ondes de différentes longueurs d'onde, le réseau donne naissance à plusieurs spectres d'ordres 1, 2, etc. Chaque nouveau spectre est plus étalé que le précédent.

Puisque la longueur d'onde de la lumière est comparable à la distance entre les fentes, les réseaux de diffraction partagent la lumière (visible, ultraviolette et infrarouge) en spectres. Les réseaux de diffraction permettent de procéder à des analyses spectrales détaillées.

Vis-à-vis des rayons X les réseaux de diffraction se comportaient comme s'ils n'existaient

pas, les rayons X passaient au travers sans subir de déviations. Il n'était donc pas exclu que les rayons X étaient des flux de particules. Mais il n'était pas interdit non plus de penser que c'était un rayonnement électromagnétique mais de très courte longueur d'onde. Supposons, en effet, que la longueur d'onde λ soit très petite. Dans ce cas, conformément à la condition de diffraction par un réseau optique linéaire $a \sin \alpha = n\lambda$, les n rayons se propageant sous un angle α seront pratiquement superposés et on n'observera aucun effet de diffraction. Or, il était inconcevable de fabriquer un réseau de diffraction avec des fentes séparées par des distances a égales à des millioniemes de micromètre. Le physicien Max Laue (1879-1960) était persuadé que les rayons X étaient un rayonnement électromagnétique ; un cristallographe qu'il connaissait affirmait que tout cristal était un réseau tridimensionnel d'atomes. Au cours d'une discussion scientifique, Laue décida de confronter son idée sur la nature des rayons X et la conception du cristallographe. « Et si, par un heureux hasard, les distances entre les atomes dans un cristal étaient du même ordre de grandeur que la longueur d'onde des rayons X ? » pensa Laue.

Il ne savait pas si un réseau tridimensionnel pouvait assumer les fonctions d'un réseau linéaire, mais décida d'en faire l'expérience. La première expérience était tout à fait simple. Sur le trajet d'un faisceau de rayons X convenablement diaphragmé, Laue plaça un gros cristal et à côté de celui-ci il plaça une plaque photographique. Il ne savait pas très bien où il fallait placer la plaque photographique puisque le cristal n'était pas un réseau linéaire ; au début, la position choisie pour la plaque était mauvaise et l'expérience ne donnait pas de résultat. Il est

amusant d'apprendre que la plaque avait été placée en une position correcte par mégarde.

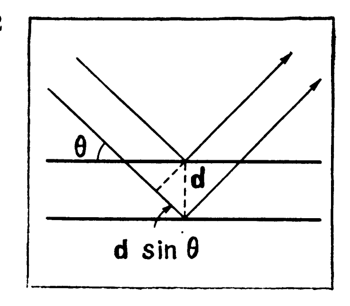
Il est bien évident que cette intervention du hasard n'influa pas sur la découverte, car parallèlement aux expériences, Laue forgeait une théorie du phénomène. Il arrive bientôt à étendre la théorie du réseau de diffraction linéaire au cas d'un réseau tridimensionnel. Selon cette théorie, les rayons diffractés ne devaient apparaître que pour certaines orientations bien déterminées du cristal par rapport à la direction d'incidence du faisceau de rayons X. La théorie prédisait que ce sont les rayons diffractés faiblement déviés qui auraient la plus grande intensité. Il en résultait que la plaque photographique devait être placée derrière le cristal perpendiculairement aux rayons incidents.

Ce sont deux Anglais, le père et le fils Bragg, qui furent parmi les premiers à s'intéresser à la découverte de Laue. Ils reproduisirent les expériences de Laue et interprétèrent sa théorie d'une façon très simple et suggestive ; à l'aide d'exemples simples, ils démontrèrent que la découverte de Laue pouvait être utilisée comme méthode d'étude de la structure atomique des substances.

Nous nous proposons d'initier le lecteur aux idées de base de la radiocristallographie et à la méthode de détermination des structures cristallines, dont la mise en œuvre permet de mesurer les distances interatomiques avec une précision d'un centième d'angström ; cette méthode permet aussi de donner une représentation de la disposition spatiale des atomes dans la molécule et d'élucider le mode d'assemblage des molécules dans le cristal.

Plaçons le cristal sur une table et faisons-le tourner autour d'un certain axe ; le pinceau de rayons X tombe perpendiculairement à l'axe de

Fig. 3.2



rotation. Voyons ce qui se passe maintenant. Examinons les phénomènes de diffraction qui auraient lieu lorsque les rayons X tombaient sur le cristal comme si les nœuds du réseau se comportaient comme des centres de diffusion.

Les Bragg démontrèrent que la diffusion des rayons X par les nœuds du réseau était équivalente à leur réflexion sélective (qui n'a lieu que pour certaines valeurs discrètes de l'angle) par les systèmes de plans réticulaires que comporte tout réseau cristallin.

Considérons un rayon, qui est une onde électromagnétique d'une certaine longueur d'onde tombant sur un cristal sous un certain angle. Cet angle sera différent pour différents systèmes de plans réticulaires. Il est légitime de supposer que n'importe quel plan atomique réfléchit les rayons X selon la loi suivante: l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion. Mais il existe une différence essentielle avec les rayons du spectre optique. A la différence de ces derniers, les rayons X pénètrent dans les profondeurs du cristal. Il s'ensuit que ces rayons seront réfléchis tant par la surface extérieure du cristal que par tous ses plans atomiques.

Considérons un certain système de plans caractérisés par une distance réticulaire d. Chacun de

ces plans « réfléchira » le rayon incident sous un même angle θ. Les rayons réfléchis doivent interférer mais un intense rayon secondaire ne peut apparaître que si tous les rayons X, après réflexion sur les plans réticulaires successifs, sont en phase. La condition est donc que la différence de marche des rayons soit égale à un nombre entier de longueurs d'onde.

La figure 3.2 représente la construction géométrique correspondante ; on voit que la différence de marche entre les rayons réfléchis par deux plans successifs est égale à $2d \sin \theta$. La condition de diffraction est donc

$$2d \sin \theta = n\lambda.$$

Cette formule fut établie simultanément par les Bragg et par le cristallographe russe G. V. Wulf, et on la désigne sous le nom de formule de Bragg-Wulf.

Tout cristal peut être divisé en systèmes de plans parallèles par un nombre infini de procédés ; mais pour les réflexions, ne sera efficace que le système ayant une distance réticulaire et une orientation par rapport à la direction des rayons incidents qui vérifient la relation de Bragg-Wulf.

Il est évident qu'avec des rayons X monochromatiques (onde électromagnétique de longueur d'onde donnée), il peut arriver qu'il n'y ait pas de réflexions pour une orientation arbitraire du cristal par rapport aux rayons incidents. Mais si on tourne le cristal, on place successivement différents systèmes de plans dans les conditions de réflexion. C'est le procédé du cristal tournant qui convient le mieux aux besoins de la pratique.

Quant à l'expérience de Laue, son succès était dû à ce que le cristal était éclairé par un « spectre blanc » de rayons X, i.e. par des ondes

dont les longueurs sont réparties de manière continue dans un certain intervalle (voir plus loin). C'est pour cela qu'avec un cristal immobile, différents systèmes de plans réticulaires se trouveront dans des positions « réfléchissantes » pour des ondes de différentes longueurs.

Actuellement, les opérations radiocristallographiques sont automatisées. On fixe un petit cristal (0,1 à 1 mm) sur un porte-objet tournant sur programme afin de placer successivement dans les positions de réflexion tous ses systèmes de plans réticulaires. Chaque plan réfléchissant (on omet le mot « système » pour raison de concision), est caractérisé, premièrement, par la distance réticulaire, deuxièmement, par les angles qu'il fait avec les axes de la maille élémentaire du cristal (la mesure de la longueur des arêtes et des angles entre les arêtes de la maille se fait automatiquement en tout premier lieu) et, troisièmement, par l'intensité des rayons réfléchis.

Plus une molécule contient d'atomes, plus grande sera la maille élémentaire, et comme le nombre de plans réfléchissants augmente avec la dimension de la maille, la quantité d'informations requises croît aussi. C'est pour cela que le nombre de réflexions mesurées varie de quelques dizaines à quelques milliers.

On a promis au lecteur d'exposer les idées sur lesquelles se fonde l'analyse des cristaux par les rayons X. Pour commencer, inversons le problème et supposons que la structure d'un cristal soit connue de façon précise et détaillée, ce qui suppose que l'on connaît les coordonnées de tous les atomes de la maille élémentaire (le lecteur est invité à revoir dans le livre 2 les données concernant la structure des cristaux). Considérons un système donné de plans réfléchis-

sants. Les résultats suivants paraissent évidents. Si la majorité des atomes étaient contenus dans des plans passant par les nœuds du réseau, tous les atomes diffuseront les rayons X avec la même phase. Le rayon réfléchi aura une forte intensité. Considérons une situation différente. La moitié des atomes se situe dans les plans réticulaires, tandis que l'autre moitié se trouve juste au milieu entre les plans réfléchissants. Dans ce cas, la moitié des atomes diffusera alors le rayon incident avec la même phase, tandis que l'autre moitié diffusera le rayon en contrephase, et il n'y aura pas de rayon réfléchi.

Ce sont les deux cas extrêmes ; dans tous les autres cas, on obtient des rayons réfléchis de différentes intensités. L'instrument de mesure qui s'appelle diffractomètre automatique est capable de mesurer des intensités des rayons réfléchis qui diffèrent de 10 000 fois.

L'intensité du rayon diffracté dépend de la disposition des atomes entre les plans réticulaires. La formule qui exprime cette dépendance est très compliquée et ne nous serait d'aucune utilité. Les résultats concernant les deux cas extrêmes suffisent pour que le lecteur croie à l'existence d'une formule où l'intensité est donnée en fonction des coordonnées de tous les atomes. La formule tient également compte de la nature des atomes, car plus l'atome contient d'électrons, plus il diffuse fortement les rayons X.

La formule qui établit un lien entre la structure et l'intensité du rayon réfléchi, contient des informations concernant l'orientation du plan réfléchissant et les dimensions de la maille élémentaire. Le nombre d'équations est égal au nombre de réflexions mesurées.

Si on connaît la structure du cristal, on peut calculer les intensités de tous les rayons et les

comparer avec les résultats expérimentaux. Mais c'est le problème inverse de celui que l'on devait résoudre : connaissant les intensités de plusieurs dizaines, centaines ou milliers de réflexions, calculer les coordonnées de tous les atomes contenus dans une maille. On pourrait penser que, disposant des calculatrices électroniques modernes, la résolution de ce problème ne présenterait aucune difficulté, même si le nombre d'équations à résoudre est important.

Mais le problème est loin d'être simple. Les données expérimentales dont on dispose ce sont les intensités des rayons réfléchis. Or l'intensité est proportionnelle au carré de l'amplitude. La formule dont il a été question ci-dessus, c'est en fait la formule des interférences. Les ondes diffusées par tous les atomes du cristal interfèrent entre elles, et leurs amplitudes s'additionnent. On calcule l'amplitude totale qui étant élevée au carré, donne l'intensité. Ce calcul est facile à faire. Or pour trouver les amplitudes, il faut calculer les racines carrées des intensités mesurées en tenant compte que toute racine carrée peut avoir les signes + et —.

Le problème n'est donc pas simple : on dispose d'autant d'équations qu'on veut pour trouver les coordonnées des atomes, mais dans le second membre de ces équations on trouve des nombres qui ne sont connus qu'au signe près.

La partie semblait perdue et les chercheurs n'essayaient même pas de résoudre ce problème. Ils adoptèrent la méthode des essais et des erreurs : en se fondant sur les données relatives à des structures proches, ils concluaient que la structure inconnue devrait présenter telles particularités. Après avoir calculé sur cette base les intensités des rayons diffractés, ils les comparaient aux intensités mesurées. En cas de désaccord, ils

prenaient pour modèle une structure différente.

Dans les cas simples, cette approche, quoique laborieuse, fournissait des résultats corrects. Mais une fois que tous les cas simples furent épuisés, il fallut s'attaquer à la solution du problème inverse.

Vers le milieu des années trente, on comprit qu'il serait possible de calculer les structures même compliquées, à condition de n'étudier que des molécules composées de plusieurs atomes légers et d'un seul atome lourd. Ce dernier contenant beaucoup d'électrons diffuse les rayons X beaucoup plus fortement que les atomes légers, ce qui permet de poser, en une première approximation, très grossière il est vrai, que le cristal ne contient que des atomes lourds. Lorsque la maille élémentaire ne comporte qu'un seul atome, il est facile de trouver ses coordonnées par la méthode des essais et des erreurs. On calcule donc ses coordonnées et en postulant qu'il est seul maître dans le réseau, on supposera que les signes des amplitudes calculées pour la structure fictive (à atomes lourds) sont les mêmes que pour la structure réelle.

Il y a une vingtaine d'années, on démontra le théorème établissant qu'il existe un lien entre les amplitudes des ondes réfléchies par les différentes familles de plans réticulaires. Ce fut une découverte de grande importance. Ainsi, par exemple, il existe une relation entre les signes des amplitudes de trois réflexions déphasées par rapport à un nœud du réseau de α, β et $\alpha + \beta$. Si le produit $\cos \alpha \cos \beta \cos (\alpha + \beta)$ est plus grand en valeur absolue que 1/8, son signe est nécessairement positif. Le lecteur est invité à vérifier ce résultat.

Le développement de cette idée conduisit à l'élaboration de méthodes d'analyse des struc-

tures dites directes. Même dans des cas assez compliqués, on peut relier l'instrument de mesure à une machine à calculer qui fournira les données sur la structure du cristal étudié.

Dès qu'on a déterminé les signes des amplitudes des ondes réfléchies, le calcul des coordonnées des atomes se ramène au problème du calcul d'un grand nombre d'équations contenant un grand nombre d'inconnues. Il importe que le nombre d'équations soit 10 ou mieux cent fois plus grand que le nombre des coordonnées des atomes qu'il s'agit de déterminer.

La technique de résolution des équations ne nous concerne pas. Signalons qu'on a recours à la construction des séries de Fourier pour la densité électronique. La théorie de cette méthode exige de bonnes connaissances des mathématiques et ne peut être exposée ici.

Quelles sont les données sur la structure des substances qu'un physicien spécialiste de la radiocristallographie peut fournir à un chimiste ? Pour s'en faire une idée, le lecteur est invité à se rapporter à la figure 3.3 qui représente la structure simple du barbiturate d'ammonium. Aujourd'hui, la détermination d'une telle structure est un « jeu d'enfant » qu'un équipement automatisé réalise sans aucune intervention humaine. La machine à calculer peut fournir les résultats sous forme de nombres (coordonnées des atomes) ou sous forme de graphiques analogues à celui représenté sur la figure 3.3. Les atomes d'espèces différentes sont représentés par des cercles de différents diamètres. Si l'usager le désire, la machine à calculer peut fournir une carte de la répartition de la densité électronique sur laquelle chaque atome est représenté de la façon qu'utilisent les géographes pour représenter les pics à l'aide de lignes d'égales hauteurs. Mais

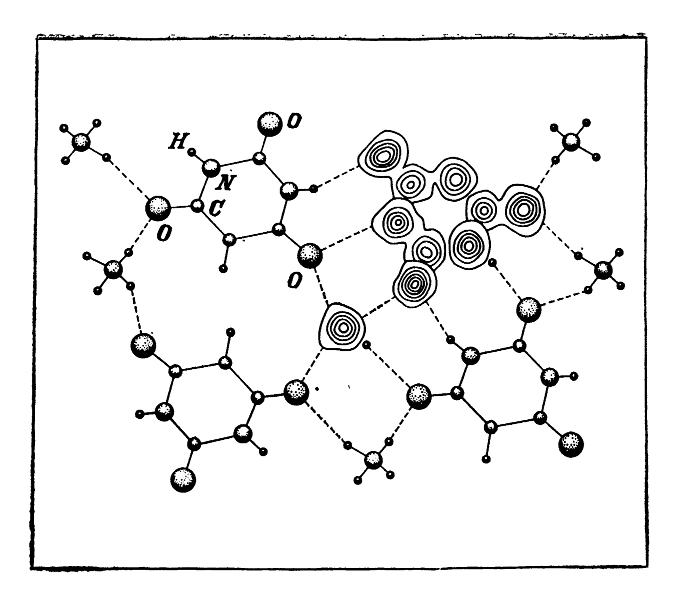


Fig. 3.3

dans le cas qui nous concerne, les lignes fermées indiquent la valeur de la densité électronique à l'endroit considéré. Le sommet du « pic » est le centre de l'atome.

L'image de la figure 3.3 n'illustre qu'une très petite partie de la contribution de la méthode esquissée au développement des connaissances scientifiques. Aujourd'hui, la mise en œuvre de cette méthode a permis de déterminer les structures de plus de 15 000 substances cristallines, y compris plusieurs dizaines de structures des protéines dont les molécules comportent des milliers d'atomes.

La détermination des structures des molécules compliquées sert de base à la chimie et à la phy-

sique biologiques. Ces sciences sont en plein essor et on en attend la découverte des secrets de la vie, des maladies et de la mort.

La radiocristallographie, quoique septuagénaire, occupe toujours la première ligne dans le développement des sciences.

SPECTRES DE RAYONS X

Nous avons mentionné au paragraphe précédent qu'on pouvait avoir affaire à des rayons X monochromatiques et à un spectre « blanc » de rayons X. Comment fait-on pour relever le spectre d'un rayonnement électromagnétique dur et dans quel cas est-il « blanc » et dans quel autre est-il monochromatique ?

Réalisons un faisceau étroit de rayons X ou de rayons gamma (en plaçant sur leur trajet deux écrans percés de petits trous) générés par une source quelconque et faisons-le tomber sur un cristal ; dans le cas le plus général, on obtiendra plusieurs rayons réfléchis par des plans vérifiant la condition de Bragg-Wulf. Si on dispose le cristal de façon que l'un de ses plans (donnant un rayon réfléchi de grande intensité) coïncide avec l'axe de rotation d'un appareil spécial (spectrographe à rayons X) et qu'on tourne le cristal pour que ce plan et le faisceau incident forment successivement tous les angles θ, dans chaque position le cristal réfléchira une composante du spectre d'une longueur d'onde déterminée. L'enregistrement des rayons réfléchis peut se faire à l'aide d'un compteur à ionisation ou à l'aide d'une plaque photographique. Par ce procédé, on arrive, d'une part, à obtenir un rayon monochromatique de toute longueur d'onde contenu dans le spectre d'émission et, d'autre part, à étudier le spectre de tout rayonnement.

Fig. 3.4

La figure 3.4 représente le spectre typique que produit un tube à rayons X, à anode en molybdène, sous une tension de 35 kV. L'examen de la forme de ce spectre permet aussitôt de supposer qu'il existe deux causes de production des spectres de rayons X. On voit en effet que le spectre résulte de la superposition de pics aigus sur une courbe continue. Il va de soi que l'origine des pics est autre que celle de la courbe continue.

Dès la découverte de la diffraction des rayons X, on s'attaqua à l'étude des spectres de rayons X. On arriva aux résultats suivants. Le spectre continu ne caractérise pas le matériau de l'anode et dépend de la tension appliquée. Ce spectre continu se termine brusquement du côté des courtes longueurs d'onde. Du côté des ondes longues, la courbe continue, en passant par le maximum, baisse progressivement sans qu'on en voit le « bout ».

L'expérience montre que lorsqu'on augmente la tension appliquée au tube, l'intensité du spectre continu augmente et sa limite se déplace du

côté des longueurs d'onde courtes. La valeur de la longueur d'onde limite est donnée par la relation simple:

$$\lambda_{min} = 12{,}34/U.$$

En termes quantiques, cette relation s'interprète de la façon suivante. La quantité eU est l'énergie qu'acquiert l'électron à la fin de son trajet cathode-anode. Il est évident que l'électron ne peut céder plus d'énergie qu'il n'en possède (eU). S'il cède toute son énergie à la production d'un quantum de rayons X ($eU = h\nu$), on retrouve, après substitution des valeurs numériques des constantes, l'égalité ci-dessus (λ en angströms, U en kilovolts).

Comme le spectre est continu, on en conclut que les électrons ne fournissent pas nécessairement la totalité de leur énergie pour générer des rayons X. L'expérience montre que la majeure partie de l'énergie du faisceau électronique est convertie en chaleur. Les tubes à rayons X ont des rendements très faibles, l'anode s'échauffe fortement et il faut la refroidir par un courant d'eau circulant dans sa masse.

Il existe une théorie expliquant la formation du spectre continu de rayons X, qui montre (on ne peut donner ici les calculs correspondants) que conformément aux lois générales du champ électromagnétique (équations de Maxwell, voir livre 3), le spectre continu résulte du freinage des électrons. Les chocs des électrons contre le corps solide ne sont pas à considérer. Si on freine les électrons lancés dans le tube par un champ électrique de sens opposé, on obtient un spectre continu de rayons X sans que l'anode y participe.

Il existe une autre possibilité encore de produire un spectre de rayons X continu. Rappelons qu'un spectre électromagnétique continu est

produit par l'émission de corps incandescents. Dans les conditions terrestres, on ne rencontre guère de spectres de rayons X de cette origine, puisque conformément à la formule donnée à la page 14 de ce livre, à la plus haute température à laquelle on peut porter un corps solide (aucun solide ne supporte une température supérieure à quelques milliers de kelvins), la longueur d'onde du rayonnement thermique n'excède pas un demi-micromètre. Mais il ne faut pas oublier l'existence du plasma. Dans les plasmas artificiels créés sur Terre, ainsi que dans les étoiles, la température peut atteindre des millions de kelvins. Dans ce cas, le spectre thermique du rayonnement électromagnétique contiendra des rayons X. Les rayons X provenant de l'espace interstellaire aident à résoudre les problèmes de l'astrophysique.

Examinons maintenant l'origine des pics qui se superposent au spectre continu de rayons X.

Ces pics sont régis par une règle inverse à celle qui concerne le spectre continu. Les positions des pics, i.e. leurs longueurs d'onde, dépendent de façon univoque du matériau de l'anode; on peut donc dire qu'il s'agit d'un spectre de raies caractéristique de l'élément de l'anode.

L'origine du spectre de raies se laisse expliquer à l'aide du modèle quantique de l'atome. Lorsqu'un électron accéléré dans un tube à rayons X frappe un atome, il y pénètre et en arrache les électrons occupant les niveaux d'énergie les plus bas. Lorsqu'un niveau profond est libéré, il est aussitôt occupé par un électron provenant d'une couche électronique plus éloignée du noyau; cette transition électronique s'accompagne d'une émission d'énergie selon la loi quantique $E_m - E_n = h\nu$. Dans les atomes d'espèces différentes, la disposition des niveaux d'énergie

est différente, et il s'ensuit que les spectres de raies sont caractéristiques de l'atome concerné.

Comme les raies du spectre caractéristique sont très intenses, on les utilise en radiocristallographie. A cette fin, il est préférable d'éliminer le spectre continu ; pour cela on oblige le faisceau de rayons X à tomber d'abord sur un cristal monochromateur avant de l'envoyer sur le cristal étudié.

Comme les spectres d'émission sont caractéristiques des éléments chimiques, le relevé des spectres de rayons X peut servir aux fins d'analyse chimique. L'analyse spectrale aux rayons X est dans de nombreux cas irremplaçable, c'est le cas, par exemple, de l'analyse des terres rares. Les intensités des raies caractéristiques sont suffisantes pour pouvoir déterminer la teneur en pour cent des différents éléments dans un mélange.

Il nous reste à dire quelques mots à propos des spectres de rayons gamma. Dans les conditions terrestres, on a affaire aux rayons gamma qui existent dans le rayonnement des corps radioactifs dont il sera question plus loin. La désintégration radioactive peut ne pas produire de rayons gamma, mais dans tous les cas le spectre des rayons gamma est toujours caractéristique de l'élément radioactif.

Tandis que les raies caractéristiques du spectre de rayons X apparaissent à la suite de transitions faisant passer l'atome d'un niveau d'énergie supérieure sur un niveau d'énergie plus basse, les rayons gamma apparaissent lorsqu'une transition analogue s'applique aux noyaux atomiques.

Les spectres gamma des transmutations radioactives sont bien connus. On dispose de tables où sont consignées les longueurs d'onde des rayons gamma émis lors des transmutations α et β des différents isotopes radioactifs.

Nous avons déjà mentionné à plusieurs reprises que la terminologie scientifique laissait à désirer. Le développement de la science est tellement rapide qu'au cours d'une seule génération le sens des mots peut changer. Tout changement de terminologie porte atteinte aux habitudes acquises et comme on ne peut mettre hors circuit les livres dont la terminologie est devenue obsolète, il faut se résoudre à bien préciser la signification actuelle des termes qu'on utilise.

De nos jours, lorsqu'on parle d'analyse radiocristallographique, on sous-entend l'étude de la structure atomique des cristaux et l'objet de ces études est le monocristal.

Mais ce n'est pas le seul problème que peut résoudre utilement la radiocristallographie. On obtient des diagrammes riches en informations, même si à la place des monocristaux on utilise des matériaux quelconques (spectrographie aux rayons X).

Si on place sur le trajet d'un pinceau de rayons X monochromatique une feuille métallique, on obtiendra sur une plaque photographique un système d'anneaux concentriques. Ce type de diagramme est appelé diagramme de Debye-Scherrer. Précisons l'origine de ces diagrammes.

La majorité des corps solides se composent de petits cristallites orientés au hasard. Lorsqu'on solidifie une substance fondue, de nombreux germes de cristallisation apparaissent en différents points. A partir de ces germes se forment de petits cristaux dont la croissance s'arrête lorsqu'ils rencontrent d'autres petits cristaux.

Comme tous les cristallites ont la même structure, ils contiennent les mêmes systèmes de plans atomiques. Considérons un système de plans de

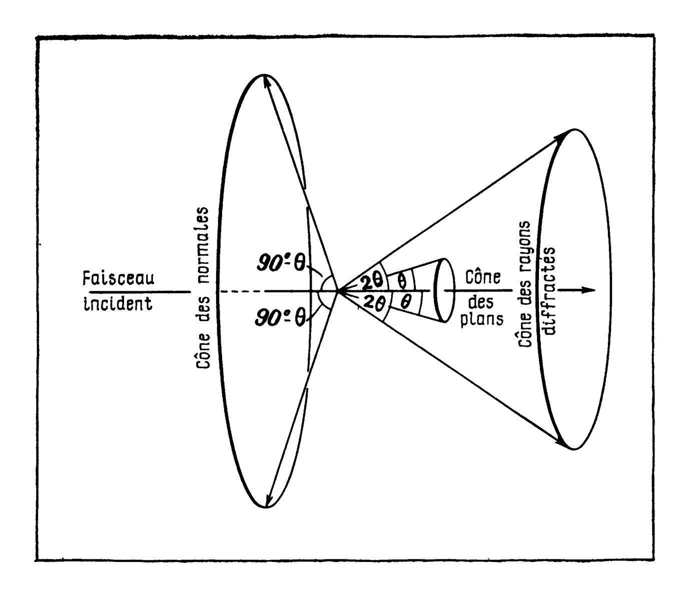


Fig. 3.5

distance réticulaire *d*. Parmi toute la multitude de cristallites (leur dimension linéaire est de l'ordre de dix-millième de centimètre), on trouve les cristallites dont les plans forment avec le rayon incident un angle θ vérifiant la condition de Bragg-Wulf. Chacun de ces cristallites donnera une petite tache sur la plaque photographique. Tous les cristallites dont les normales aux plans atomiques forment un cône (fig. 3.5) participent à la réflexion ; il s'ensuit que les rayons réfléchis forment aussi un cône. L'intersection de ce cône par la plaque photographique est un anneau. En mesurant les rayons des anneaux et en connaissant la distance entre l'objet et la plaque photographique, on trouve l'angle de

Bragg θ ; on peut calculer alors toutes les distances réticulaires de la substance étudiée.

A l'aide de ce type de diagramme de diffraction, on arrive à distinguer les corps cristallins et les corps amorphes. Un corps amorphe ne possède pas de plans réfléchissants ; il s'ensuit que son diagramme de diffraction ne comportera pas de système d'anneaux bien nets. Même dans les corps amorphes il existe un certain ordre de disposition des molécules et ce pour la raison que les atomes ne peuvent « monter » les uns sur les autres. On démontre par des calculs que le diagramme de diffraction des corps amorphes comportera un ou plus rarement deux anneaux diffus.

Les anneaux que l'on observe sur les diagrammes de diffraction fournissent des données sur la structure des matériaux les plus divers — métaux, polymères, composés naturels. Si la substance se compose de gros grains cristallins, l'anneau de diffraction sera discontinu, composé d'une succession de petites taches. Si les cristallites ne sont pas distribués au hasard, mais sont orientés suivant un certain plan ou un certain axe, comme cela se produit dans les fils et les métaux laminés, dans les fils de polymères et dans les fibres naturelles, les anneaux de diffraction s'en ressentent aussitôt. On conçoit aisément que lorsque les cristallites sont orientés (existence d'une texture) les rayons réfléchis par les plans atomiques ne pourront plus être distribués de façon continue sur la surface du cône. A la place d'anneaux on voit alors apparaître une succession d'arcs de cercle. Si le degré d'orientation des cristallites est grand, ces arcs de cercle se réduisent à des taches de petites dimensions.

Il est évident qu'il n'est pas facile de donner une description détaillée de la structure d'après l'aspect du radiogramme. Dans ce cas la mé-

thode des essais et des erreurs joue le rôle essentiel. On postule à priori différents types de structures et on calcule pour ces modèles les figures de diffraction des rayons X pour les comparer aux résultats expérimentaux jusqu'à ce que l'on arrive à la coïncidence.

En radiocristallographie, on distingue, de façon assez conventionnelle d'ailleurs, la diffusion à grands angles et la diffusion à petits angles. Conformément à la formule de Bragg-Wulf donnée plus haut, la diffusion à grands angles s'observe lorsque la périodicité de la structure se manifeste sur de petits intervalles (3 à 10 Å); dans le cas où les rayons X réfléchis (ou diffusés) donnent une figure de diffraction étroitement centrée sur le rayon incident la structure examinée manifeste une périodicité à grande distance.

Dans le cas de métaux, on obtient généralement des anneaux de diffraction à grands angles puisque les métaux se composent de petits cristallites dont chacun a des réseaux réguliers avec des mailles de quelques angströms.

Dans le cas de substances composées de macromolécules (nombreuses substances naturelles, comme la cellulose ou l'acide désoxyribonucléique et différents polymères synthétiques tels que le polyéthylène, le nylon, le capron, etc., bien connus même des lecteurs qui n'ont aucune notion de chimie) on se trouve en présence de circonstances bien curieuses. Dans certains cas on obtient des radiogrammes formés d'anneaux de grands diamètres correspondant donc à des dispersions à grands angles, comme dans le cas de métaux. Dans d'autres cas, plus rares, les anneaux de diffraction sont absents mais on constate l'existence de rayons diffractés qui sont proches de la direction du rayon incident. Enfin il existe

des cas où une substance fait preuve des dispersions à grands et à petits angles simultanément.

On dit que la diffusion est à petits angles (notons une fois de plus que la division en diffusions à petits angles et à grands angles est quelque peu conventionnelle) lorsqu'elle se produit dans la gamme de quelques minutes d'angle à 3-4°. Plus l'angle de diffraction est petit, plus grande est la période de répétition des éléments de structure qui déterminent la diffraction.

La diffusion à grands angles est déterminée par la disposition régulière des atomes dans les cristallites, tandis que la diffusion à petits angles est liée à une disposition ordonnée des groupements dits surmoléculaires. Il peut arriver qu'il n'y ait aucun ordre à l'intérieur de ces groupements comportant des centaines ou des milliers d'atomes. Mais si ces grands groupements forment des réseaux mono, bi ou tridimensionnels, la diffusion à petits angles en témoignera. Afin que le lecteur puisse visualiser ces groupements ordonnés, on lui suggère de s'imaginer un empilement régulier de sacs de pommes de terre. Notons que ce type d'arrangement se retrouve dans de nombreux systèmes biologiques. Par exemple, les longues molécules, qui constituent les tissus musculaires, sont empilées à la manière de l'empilement compact de crayons de section circulaire. La diffusion à petits angles des rayons X montre qu'on retrouve cet arrangement hautement ordonné dans les membranes intracellulaires, dans les systèmes protéiques tels que virus, etc.

En théorie de diffraction, on démontre un théorème intéressant que le lecteur trouvera tout naturel, sans démonstration. On peut montrer de façon rigoureuse que la figure de diffraction ne change pas si on intervertit dans l'objet pro-

duisant la diffraction les trous et les intervalles opaques. Il arrive parfois que ce théorème crée des désagréments aux chercheurs ; cela se produit lorsqu'on peut expliquer la diffusion des rayons X aussi bien par la présence de pores que par celle d'inclusions étrangères dans l'objet étudié. L'étude des pores (dimensions, forme, nombre par unité de volume) présente une grande importance pour la pratique. Ces particularités de la structure des fibres synthétiques déterminent la qualité des colorations qu'elles prennent à la teinture. Une répartition irrégulière des pores conduit à une coloration irrégulière et à une mauvaise qualité des tissus.

Tout cet exposé montre bien que la radiocristallographie et la radiologie des matériaux trouvent de nombreuses applications, l'une servant aux études et aux recherches, l'autre aux contrôles de fabrication.

CHAPITRE 4

GÉNÉRALISATIONS DE LA MÉCANIQUE

MÉCANIQUE RELATIVISTE

La mécanique de Newton, qui a fait l'objet du 1er livre, est une des plus brillantes réalisations de l'esprit humain. Elle permet de calculer les trajectoires des planètes et des fusées, le comportement des mécanismes. Les développements que connut la Physique au XXe siècle mirent en lumière deux limitations de la mécanique newtonienne: ses lois cessent d'être valables, d'une part, lorsqu'il s'agit du mouvement de particules de petite masse et, d'autre part, lorsqu'il s'agit de corps animés de vitesses proches de la vitesse de la lumière. Dans le cas de très petites particules on remplace la mécanique newtonienne par la mécanique ondulatoire, tandis que pour les corps animés de très grandes vitesses, on fait appel à la mécanique relativiste.

Chaque fois que l'on se trouve confronté à de très grandes forces de gravitation, on est amené à modifier la mécanique classique. Les champs de gravitation d'une intensité défiant l'imagination, qui déterminent le comportement des étoiles superdenses, ne peuvent être décrits par les formules simples que le lecteur a appris à connaître dans le livre 1. Mais on laissera de côté cette dernière question pour se consacrer aux très importantes généralisations qu'on doit introduire pour étudier le mouvement des microparticules et le cas de vitesses proches de la vitesse de la lumière.

Commençons par la mécanique relativiste. La voie que l'on suivit pour élaborer cet important chapitre de la Physique a été non seulement sinueuse mais semble avoir été tracée à travers des continents inconnus. Tout commença à propos de l'éther universel. A la fin du XIX[e] siècle, les physiciens étaient très satisfaits de leur œuvre. Le professeur de lycée de Max Planck le déconseillait de se consacrer à la Physique vu que cette science était sur le point d'être parachevée. Deux petits défauts dépareillaient l'aspect de ce magnifique édifice : d'une part on n'arrivait pas à expliquer le rayonnement du corps noir (c'est en élucidant ce « petit défaut » que fut créée la physique quantique), et d'autre part les résultats des expériences de Michelson donnaient bien du souci aux physiciens. En effet, cette expérience, qui démontrait que la vitesse de la lumière ne se composait pas avec la vitesse de la Terre et était indépendante de la direction, remettait en question les propriétés de l'éther universel.

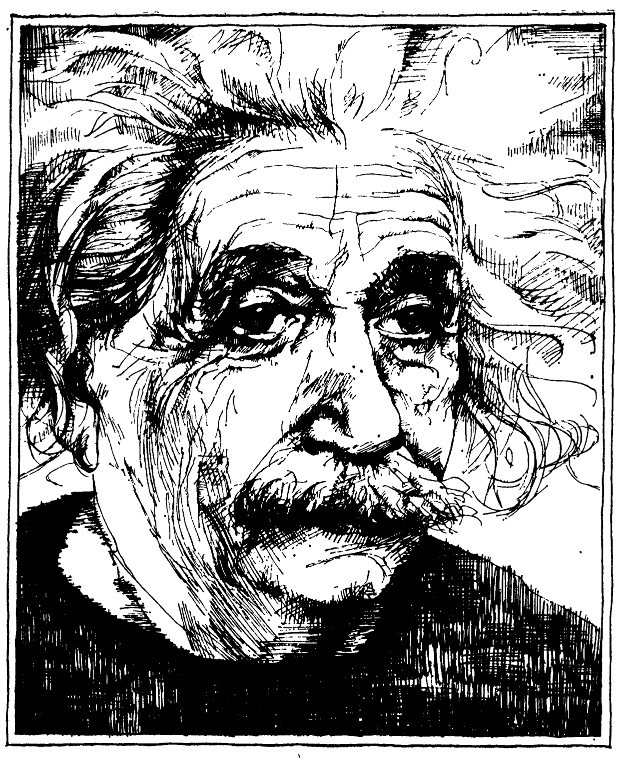
Rares étaient les physiciens qui mettaient en doute l'existence d'une substance subtile dont les vibrations constitueraient les ondes électromagnétiques. Cent ans après, on s'étonne que malgré le grand nombre de résultats absurdes auxquels conduisait l'« hypothèse de l'éther », la grande majorité des savants, et des savants de grand talent, s'évertuaient à imaginer toujours de nouvelles hypothèses pour sauver l'idée que la lumière résulte des vibrations de ce milieu subtil.

Certains s'imaginaient l'éther comme une mer calme à travers laquelle les planètes se frayaient un chemin; d'autres pensaient que l'éther pouvait être entraîné par les objets mobiles, tout comme l'est l'air. Personne ne fit la remarque, bien évidente d'ailleurs, que les vibrations des

vecteurs électrique et magnétique se produisant en un *point* ne peuvent être expliquées par des déplacements mécaniques. On arrivait à grand-peine à joindre les deux bouts, on élaborait des théories qui conduisaient à des expressions mathématiques formellement correctes (dans ces expressions figurait notamment la fameuse racine carrée $\sqrt{1-(v/c)^2}$, où v est la vitesse du corps et c la vitesse de la lumière), qui cependant étaient faussement interprétées. Mais c'est surtout l'expérience de Michelson, réalisée en 1881, qui affligea les penseurs. A l'aide de l'interféromètre, qui a été décrit au chapitre 2, Michelson établit que la vitesse de la lumière suivant le sens de mouvement de la Terre sur l'orbite et suivant une direction rectangulaire était pratiquement la même.

Quoique néfaste pour la théorie de l'éther, ce résultat ne décida pas les physiciens les plus en vue à renier leur foi en cette substance subtile qui imprègne tous les corps. On affirmait volontiers que l'expérience de Michelson débarrassait la physique de la notion du vent de l'éther, mais que l'image du monde devenait encore plus belle avec un éther fixe et l'idée de l'espace absolu de Newton, par rapport auquel se déplaçaient tous les corps célestes.

Pour expliquer les résultats de Michelson, des physiciens aussi éminents que Joseph Larmor (1857-1942) et Hendrik Anton Lorentz (1853-1928) invoquèrent l'hypothèse de la contraction des corps suivant la direction de leur mouvement. Cependant des contradictions subsistaient et le caractère artificiel de l'interprétation de nombreux phénomènes du domaine de l'électrodynamique laissait planer un sentiment d'insatisfaction.



ALBERT EINSTEIN (1879-1955). Savant génial, créateur de la théorie de la relativité qui révolutionna la pensée scientifique. En 1905, Einstein publie un article consacré à la théorie de la relativité restreinte. En 1907, il établit la formule qui relie l'énergie et la masse du corps.
En 1915, il expose la théorie de la relativité généralisée, d'où découlent de nouvelles lois de gravitation et des considérations sur la courbure de l'espace.
Sa contribution à la Physique ne se limite pas à la théorie de la relativité. En se fondant sur les travaux de Planck, il conclut à l'existence de corpuscules de lumière, les photons, et explique plusieurs phénomènes fondamentaux, dont l'effet photoélectrique.

C'est Albert Einstein (1879-1955), le plus grand physicien du XXe siècle, qui trancha le nœud gordien de toutes les contradictions existant dans la physique.

Les raisonnements d'Einstein avaient pour point de départ le principe de la relativité. Après Galilée il était indubitable qu'en ce qui concernait les mouvements mécaniques tous les référentiels à inertie étaient équivalents (le lecteur est invité à revoir dans le livre 1 tout ce qui se rapporte à cette question). Il semblait que c'était un résultat curieux, d'une esthétique douteuse, qu'il y ait équivalence pour les mouvements mécaniques mais pas pour les phénomènes électromagnétiques.

Rejetons ce point de vue peu élégant et posons que le principe de la relativité s'applique à tous les phénomènes.

Et maintenant, réfléchissons aux résultats des expériences de Michelson. Einstein n'est nullement satisfait par les tentatives d'expliquer ces résultats en assimilant la propagation de la lumière dans l'« éther » à la propagation du son dans l'air. Il sent bien que quelque chose ne « colle » pas, et tout d'abord le fait qu'on mette sur le même plan la lumière et le son. Parce que tous deux sont sujets à diffraction? Ce n'est vraiment pas un argument bien fort. Rejetons donc tous ces points de vue et adoptons le postulat suivant (quoiqu'il paraisse insensé à première vue): pour tous les observateurs en mouvement dans tous les référentiels à inertie, la vitesse de la lumière dans le vide est la même. Quels que soient la direction et le sens de propagation d'une onde électromagnétique et quel que soit le corps qui l'a émise, aussi bien les terriens que les habitants d'autres galaxies (pour faire plaisir aux amateurs de science-fiction) trouveront que la

vitesse de la lumière dans le vide est égale à 299 792 km/s.

Soit une motrice qui roule sur une partie rectiligne d'une voie de chemin de fer avec une vitesse constante v. Sur une route parallèle à la voie de chemin de fer, roule un motocycliste dans le même sens que la motrice. Un gendarme, posté à côté de la voie de chemin de fer, siffle pour avertir le motocycliste qu'il roule à une vitesse u supérieure à la vitesse autorisée (son radar lui signala que le motocycliste roulait à 85 km/h). Le conducteur de la motrice observe le motocycliste qui le rattrape et le dépasse. Le conducteur mesure à l'aide de son radar la vitesse u' du motocycliste et trouve qu'elle est égale à 35 km/h. Inutile de faire la preuve que la vitesse v de la motrice est égale à 50 km/h. La loi de la composition des vitesses

$$u = v + u'$$

qui semblait archi-évidente, ne s'appliquerait pas à la lumière, car les photons se meuvent avec la même vitesse par rapport à deux observateurs se trouvant dans des référentiels à inertie différents.

Il fallait avoir le génie d'Einstein pour rejeter la loi de la composition des vitesses non seulement pour la lumière mais aussi pour tous les corps, car il fallait utiliser la même approche pour tous les phénomènes physiques, qu'ils soient électromagnétiques ou mécaniques.

Dès qu'on adopte cette approche, il n'y a plus rien à expliquer dans l'expérience de Michelson. Puisque la vitesse de la lumière est une constante universelle, elle doit être constante dans toutes les directions, notamment suivant la direction de l'orbite terrestre et suivant la direction rectangulaire.

Partant de ces principes, on arrive aussitôt à la conclusion que la vitesse de la lumière est la plus grande vitesse pouvant exister *). En effet, si la vitesse de la lumière ne vient pas s'ajouter à la vitesse de la source lumineuse, rien ne peut avoir une vitesse supérieure à celle de la lumière. Dans ses mémoires, Einstein note qu'en 1896 il se posa la question suivante : « Si on se lançait à la poursuite d'une onde lumineuse avec la vitesse de la lumière, se trouverait-on en présence d'un champ d'onde indépendant du temps? Il me sembla que c'était impossible ».

Ainsi aucun corps et aucune particule ne peuvent se déplacer avec une vitesse supérieure à celle de la lumière. Réfléchissons bien à cette assertion, et comme elle paraît paradoxale, exposons-la encore une fois. Si d'un point de la Terre ou d'une autre planète on envoie vers un autre point de la même planète une onde électromagnétique, la vitesse de propagation de cette onde, mesurée par un observateur au repos sur la planète et par un observateur volant au-dessus de la planète à une vitesse fantastique, sera la même. Cette assertion s'applique aussi à toute particule animée d'une vitesse égale à la vitesse des ondes électromagnétiques. Dans la théorie d'Einstein, la lumière n'est pas un cas particulier.

---

*) La mecanique relativiste peut admettre l'existence de particules animées de vitesses plus grandes que la vitesse de la lumière. Les théoriciens baptisèrent ces particules hypothétiques du nom de tachyons. Mais même si ces particules existaient, la vitesse de la lumière représenterait la limite inférieure de leur vitesse. L'auteur du présent ouvrage estime que la théorie des tachyons est un jeu de l'esprit mathématique des théoriciens. Mais si ces particules existaient, elles ne pourraient pas affecter les événements évoluant dans l'Univers.

Et que se passe-t-il lorsqu'un corps est animé d'une vitesse inférieure à la vitesse de la lumière ? Dans ce cas aussi la règle simple de composition des vitesses que nous utilisons couramment, est inadéquate, mais les écarts par rapport à la règle simple ne deviennent sensibles que lorsque la vitesse du corps est très, très grande.

La mécanique relativiste (c'est le nom qu'on donne à la mécanique des corps animés de grandes vitesses) conduit à la formule de composition des vitesses suivante :

$$V=\frac{v+v'}{1+vv'/c^2}.$$

Que le lecteur évalue lui-même quelles valeurs devraient avoir les vitesses v et v' pour que les corrections à la règle simple deviennent nécessaires.

Qu'en est-il notamment avec les vols dans l'espace cosmique ? La règle simple de composition des vitesses est-elle valable lorsqu'il s'agit de vitesses de l'ordre de plusieurs dizaines de kilomètres par seconde ?

On sait qu'il est souhaitable de lancer une fusée dite « secondaire » d'un vaisseau spatial porte-fusée. Il est probable que c'est ce procédé qui sera mis en œuvre pour envoyer des fusées à la périphérie du système solaire. Notons v la vitesse du vaisseau spatial par rapport à la Terre, et v' la vitesse de la fusée par rapport au vaisseau spatial d'où elle a pris son essor. Posons que v et v' soient tous deux égaux à 10 km/s. Calculons la vitesse de la fusée par rapport à la Terre à l'aide de la formule exacte. On constate qu'à l'unité au dénominateur ne vient s'ajouter que la fraction $10^2/(9\cdot 10^{10})\approx 10^{-9}$. La correction est donc parfaitement négligeable et par

conséquent la règle classique de composition des vitesses est valable.

Dans quels cas pratiques la mécanique relativiste s'applique-t-elle? On donnera plus loin une réponse à cette question, et en attendant il faut examiner les conséquences que l'on peut tirer des hypothèses qui ont été formulées. Puisqu'il faut abandonner la règle de composition des vitesses, on doit s'attendre à ce qu'il faudra apporter des corrections notables aux autres formules de la mécanique.

Comme on a souligné plus haut, l'expérience de Michelson a joué un rôle de premier plan dans la création de la théorie de la relativité.

Il ne nous servira à rien d'analyser la marche des rayons dans l'interféromètre de Michelson, mais une discussion d'événements beaucoup plus simples nous sera profitable. Supposons que, quelque part sur Terre, on ait construit le dispositif simple constitué par une colonne, en haut de laquelle à une hauteur l du niveau de la Terre, on aura placé un laser. Le rayon laser, infiniment étroit, se propage suivant la direction d'un rayon terrestre, se réfléchit dans un miroir posé à terre, retourne vers la source et tombe sur une cellule photoélectrique ; celle-ci est disposée de telle façon qu'on peut admettre que la source et le récepteur de lumière sont confondus en un même point S (fig. 4.1). A l'aide d'un chronomètre ultraperfectionné, on pourrait fixer deux moments : celui où la lumière est partie de la source et celui où elle est arrivée au récepteur. Deux observateurs observent ces événements, l'un se trouvant à côté de l'installation et l'autre sur une planète lointaine. Ces deux observateurs mesurent l'intervalle de temps τ qui s'écoule entre les deux événements : le départ et le retour de la lumière au point S. Le premier observateur

trace l'épure la plus simple qui soit de la marche du rayon lumineux : il admet que les trajets à l'aller et au retour sont confondus et le justifie par la relation $\tau = 2l/c$. L'observateur de la planète note l'instant de départ de la lumière et de son arrivée au récepteur photoélectrique. Il mesure ainsi un intervalle de temps τ et pour s'assurer qu'il a obtenu un résultat correct, il fait un dessin de la marche du rayon laser. Pour cet observateur les positions du point S à l'instant où il déclenche le chronomètre et à l'instant où il note la réaction du récepteur photoélectrique, sont différentes. Comme ce second observateur connaît la vitesse de la Terre par rapport à sa planète, son dessin se présente sous forme d'un triangle équilatéral, de base $v\tau$ et de hauteur l. A l'aide du

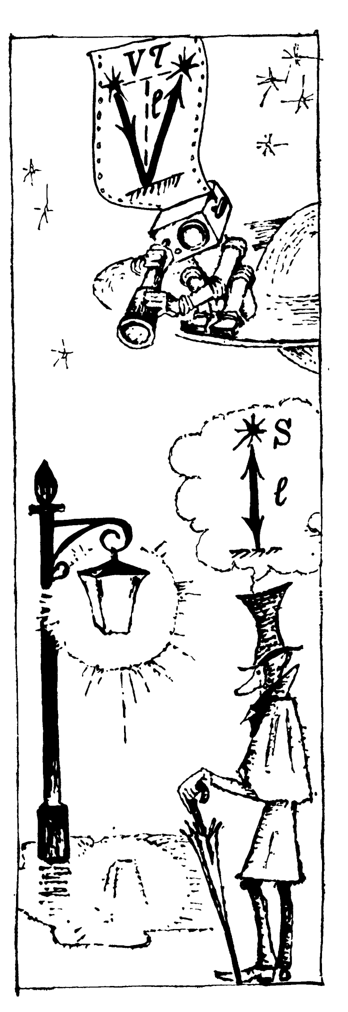


Fig. 4.1

théorème de Pythagore, l'observateur n° 2 trouve que le chemin parcouru par le rayon lumineux est égal à $2\sqrt{l^2 + (v\tau/2)^2}$. La longueur de ce chemin est égale à $c\tau$ puisque la vitesse de la lumière est la même pour tous les observateurs. Il s'ensuit que l'intervalle de temps entre les deux instants notés est égal à

$$\tau = \frac{2l}{c\sqrt{1-v^2/c^2}}.$$

Quel curieux résultat! Pour l'observateur terrestre l'intervalle de temps qui s'écoule entre ces deux événements est égal à $2l/c$.

Si on fait appel à la logique, on est conduit à conclure que le temps mesuré par l'observateur au repos n'est pas le même que celui que mesure l'observateur en mouvement.

Le temps que mesure l'observateur immobile est appelé temps propre, que l'on dénote par τ_0. On trouve que le temps mesuré par l'observateur qui se déplace avec la vitesse v est lié au temps propre par la relation

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1-\beta^2}} \text{ avec } \beta = \frac{v}{c}.$$

Cela signifie que le chronomètre en mouvement marche plus lentement qu'un chronomètre au repos. Une fois qu'on a admis les postulats de base, ce résultat s'impose nécessairement, quoiqu'il ait pour conséquence l'abandon de la notion de simultanéité.

Mais alors ne pourrait-il pas se faire que du point de vue d'un observateur, c'est Jim qui aurait tiré, après quoi John serait tombé raide mort, tandis que selon un autre observateur, John serait tombé avant que Jim tirât? Lecteurs, rassurez-vous, la mécanique relativiste ne conduit à aucune absurdité et ne viole jamais le principe

de causalité. On pourrait le démontrer très simplement, mais la place nous manque.

Il faut cependant consacrer quelques lignes au paradoxe des jumeaux, que l'on invoque parfois comme preuve de la déficience de la théorie. Jean et Pierre sont des jumeaux. Pierre dit adieu à Jean et quitte la Terre à bord d'un vaisseau spatial, dont la vitesse de croisière est proche de la vitesse de la lumière. Au bout d'un certain temps, Pierre revient sur Terre. Comme le chronomètre de Pierre marchait plus lentement, celui-ci revient sur Terre à peine vieilli et y retrouve son frère Jean qui est devenu un vieillard.

Or il n'est pas possible d'organiser cette rencontre des jumeaux en respectant les conditions requises pour que nos formules restent valables. Il faudrait pour cela que Pierre inverse sa vitesse et de ce fait les conclusions qui concernent les référentiels à inertie ne s'appliquent pas à notre cas.

La relativité du temps n'est pas le seul résultat de la nouvelle théorie. De même que le chronomètre qu'un observateur tient dans sa main marche le plus vite, la longueur l_0 de la tige qu'il tient dans sa main est maximale. Pour un autre observateur se trouvant en mouvement avec la vitesse v le long de la tige, cette longueur est égale à $l_0 \sqrt{1-\beta^2}$.

Dans l'expression de la masse apparaît la même racine carrée. La masse m_0 d'un corps qu'un observateur « tient dans sa main » est appelée masse au repos. C'est la valeur minimale de la masse du corps. Pour un observateur en mouvement

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

Il est naturel que la masse croisse avec la vi-

tesse. En effet, puisqu'il existe une limite à la vitesse, il doit être de plus en plus difficile d'accélérer une particule à mesure qu'on se rapproche de cette limite. Or cela signifie que la masse de la particule augmente.

Pendant longtemps on n'eut pas l'occasion de se trouver en présence de vitesses assez grandes pour que la racine carrée figurant dans les formules de la distance et du temps soit sensiblement différente de l'unité. Ce n'est que récemment qu'on put s'assurer de la justesse de la formule du temps.

En ce qui concerne la dépendance de la masse avec la vitesse, elle fut observée pour un flux d'électrons avant qu'Einstein publiât sa théorie. La formule exprimant la variation de la masse en fonction de la vitesse est devenue une formule d'ingénieur. On verra dans le paragraphe suivant que cette formule doit être utilisée dans les études des accélérateurs de particules. Dans ces machines très coûteuses, les particules sont accélérées si fortement que la racine carrée est plus proche de zéro que de l'unité.

La formule de la dépendance de la masse avec la vitesse fut établie avant Einstein, mais on l'interprétait incorrectement.

La relation devenue fameuse $E = mc^2$, établissant un lien entre la masse et l'énergie, fut établie par Einstein lui-même. Cette formule, tout comme les formules exprimant les variations de l, τ et m avec la vitesse, résultent directement des postulats de la théorie.

Si on multiplie la masse par le carré de la vitesse de la lumière, on obtient mc^2 pour un corps en mouvement et m_0c^2 pour un corps au repos. La différence de ces expressions est

$$mc^2 - m_0c^2 = m_0c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1\right).$$

Utilisons l'égalité approchée

$$\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \approx 1+\frac{1}{2}\beta^2$$

que le lecteur vérifiera facilement. La différence ci-dessus s'écrit maintenant

$$mc^2 - m_0c^2 = \frac{m_0v^2}{2}$$

et représente l'énergie cinétique du corps.

C'est en réfléchissant à ce résultat qu'Einstein arriva à une conclusion fondamentale. L'énergie d'un corps en mouvement peut s'exprimer par l'expression

$$E = mc^2.$$

Cette énergie se compose de l'énergie de repos m_0c^2 et de l'énergie de mouvement. Ne disposant d'aucune donnée sur la structure du corps, ne connaissant pas la nature des forces d'interaction s'exerçant entre ses particules, on peut néanmoins affirmer que son énergie interne est égale à

$$U = m_0c^2.$$

L'énergie interne d'un corps ayant une masse de 1 kg est égale à 10^{17} J. Cette énergie est équivalente à la quantité de chaleur qui serait libérée par la combustion de 3 millions de tonnes de charbon. Les physiciens ont appris à libérer une petite partie de cette énergie en désintégrant des noyaux atomiques ou en provoquant leur fusion; il en sera question plus loin.

On doit remarquer que l'équation d'Einstein $E = mc^2$ ne concerne pas seulement l'énergie interne, c'est une équation universelle. Mais, tout comme dans le cas du paradoxe des jumeaux, cette relation entre la masse et l'énergie ne peut être vérifiée. En effet, si on chauffe une

tonne de molybdène à 1000 K, la masse ne s'accroîtra que de 3 millionièmes de gramme. Ce n'est que grâce à l'énormité des forces intranucléaires qu'on a réussi à s'assurer que l'équation $E = mc^2$ était juste.

Il est opportun d'attirer l'attention du lecteur sur le fait que bien souvent l'énoncé de cette équation laisse beaucoup à désirer. On dit, par exemple, que la masse se convertit en énergie ; ou pire encore, que la matière se transforme en énergie. Or la vraie signification de la formule $E = mc^2$ est la suivante : quelles que soient les transformations mutuelles des différentes formes de la matière, à toute variation d'énergie du système correspond une variation équivalente de sa masse. L'énergie et la masse sont deux caractéristiques de la matière liées l'une à l'autre de façon univoque par l'équation d'Einstein.

PARTICULES ANIMÉES DE VITESSES PROCHES DE LA VITESSE DE LA LUMIÈRE

Depuis toujours, L'Homme cherche à découvrir les constituants élémentaires de tout ce qui existe. Mais pendant des siècles, cette question ne faisait que l'objet de débats scolastiques. Dès qu'il devint possible de briser effectivement les molécules, les atomes et les noyaux atomiques, les physiciens s'attaquèrent à cette œuvre. Il faut disposer pour cela de « projectiles », et plus l'énergie de ces « projectiles » sera grande, plus il y aura de chance d'arracher ses secrets à la Nature.

L'histoire de la production de particules rapides commença en 1932, lorsque l'équipe de Rutherford réalisa un appareil pour la production de protons qui y acquiéraient une énergie atteignant 500 keV. On conçut ensuite les cyclotrons où l'énergie des protons était comptée en méga-

électrons-volts (rappelons que méga signifie million). L'invention du synchrotron permit de porter l'énergie des protons à un milliard d'électrons-volts, et ouvrit l'ère des gigaélectrons-volts (giga — milliard). Actuellement, on dispose de projets de machines où l'énergie atteindra des milliers de milliards d'électrons-volts. En 1975, au Congrès International qui s'est tenu à Serpoukhov, où se trouve l'une des plus puissantes installations de ce type, les physiciens ont avancé l'idée d'une installation circulaire de 16 km de diamètre.

Mais le lecteur aimerait connaître le principe de fonctionnement de toute cette machinerie, savoir pourquoi on doit conférer une forme circulaire à ces installations, et enfin à quoi elles servent.

En fait tout dispositif électronique à vide fonctionnant sous haute tension est un accélérateur de particules. L'énergie cinétique d'une particule qui a été accélérée jusqu'à ce qu'elle possède une grande vitesse v est donnée par une formule que le lecteur connaît déjà :

$$\frac{mv^2}{2} = eU.$$

Les tubes à rayons X et les tubes de télévision sont en fait des accélérateurs de particules.

Mais par ce procédé simple on ne peut obtenir de bien grandes vitesses. On n'utilise la dénomination accélérateur de particules que lorsqu'il s'agit d'installations lançant les particules à des vitesses proches de la vitesse de la lumière. Pour y arriver on doit soumettre les particules à une succession de champs. On conçoit que l'accélérateur linéaire est peu efficace puisque pour obtenir quelques dizaines de milliers d'électrons-volts (une misère) il faut déjà un trajet de plu-

sieurs centimètres et pour arriver à une énergie de dix milliards d'électrons-volts, la longueur de l'accélérateur linéaire devrait être de l'ordre d'une dizaine de kilomètres.

La solution la plus simple ne convient donc pas. En 1936, Ernest Lawrence (1901-1958) inaugura l'ère des accélérateurs circulaires qu'il baptisa cyclotrons. Dans les cyclotrons les particules sont accélérées par un champ électrique et à l'aide d'un champ magnétique sont maintes fois replacées dans la partie du circuit où agit le champ accélérateur.

L'accélérateur de Lawrence ressemble à une boîte de conserve coupée en deux le long d'un diamètre. A ces deux moitiés est appliquée une tension rapidement variable. Les particules sont accélérées pendant le temps où elles traversent l'espace séparant les deux moitiés du dispositif. A l'intérieur de la « boîte de conserve », les particules se déplacent sous l'action d'un champ magnétique dirigé normalement au fond de « boîte » suivant des trajectoires circulaires. On sait que dans ce cas la particule chargée décrit une trajectoire circulaire de rayon

$$R = mv/eH.$$

La durée d'une révolution est

$$T = 2\pi m/eH.$$

Afin que le champ électrique régnant dans l'espace séparant les deux moitiés de la machine puisse agir sur les particules, il faut que la tension alternative varie à une cadence telle que son signe change juste à l'instant où la particule pénètre dans cet espace.

Les charges sont produites au centre de la machine (par exemple on produit des protons par ionisation de l'hydrogène). La première trajec-

toire circulaire aura un petit rayon, mais à chaque tour le rayon augmente puisqu'il est proportionnel à la vitesse de la particule (voir formule).

On pourrait penser qu'en augmentant les dimensions du cyclotron et donc le rayon de la trajectoire circulaire, on pourrait communiquer à la particule une énergie aussi grande qu'on le voudrait. Dès que l'énergie aura atteint la valeur prévue, il suffirait de laisser sortir le faisceau de l'appareil à l'aide d'une plaque de déflexion. Tout serait simple, n'était la dépendance de la masse avec la vitesse. La formule d'Einstein exprimant la variation de la masse avec la vitesse, qui paraissait dénuée de toute importance pratique, est essentielle pour le calcul des accélérateurs circulaires.

Puisque la masse des particules croît à mesure qu'augmente leur vitesse, la période de révolution ne peut rester constante et augmente. La particule retarde sur l'horaire simple et ne parvient pas à pénétrer dans l'intervalle où elle est accélérée à l'instant où la phase de la tension varie de 180°. A mesure que la vitesse augmente, le champ électrique ne pourra plus relancer les particules et se mettra même à les freiner.

Le cyclotron a permis de conférer aux protons une énergie allant jusqu'à 20 MeV. Cela paraît raisonnable, mais les physiciens ont besoin d'instruments toujours plus puissants et pour obtenir des énergies plus grandes il a fallu chercher d'autres solutions.

La forme de la formule de la période de révolution des particules suggère la solution du problème. Puisque la masse croît avec la vitesse, pour que la période reste constante, il faut augmenter de façon synchrone l'intensité du champ magnétique. Cette solution paraît simple, mais il faut encore tenir compte de ce que le rayon de la

trajectoire augmente à chaque nouveau tour. Il faut donc que les accroissements synchronisés de la masse et du champ magnétique soient adaptés aux rayons croissants des trajectoires des particules. Une analyse minutieuse de cette situation montre que pour un taux donné d'accroissement du champ magnétique, il existe des particules pour lesquelles les conditions d'accélération continue sont satisfaites. Un autre résultat particulièrement important est qu'il se produit une espèce de mise en phase automatique. Une particule qui aurait une énergie plus grande que celle qui correspond au rayon de sa trajectoire sera freinée par suite d'un excès de croissance de sa masse, et au contraire une particule ayant une énergie plus petite sera accélérée.

En n'utilisant que les formules simples du rayon et de la période de révolution, le lecteur peut se rendre compte que c'est bien ainsi que tout doit se passer (il faut choisir un taux d'accroissement de l'intensité du champ magnétique et calculer les trajectoires des particules ; la représentation graphique des résultats laissera transparaître le principe de la mise en phase automatique). En principe ce procédé permet de porter la vitesse des particules jusqu'à la limite, à condition de mettre en action une méthode d'accélération par impulsions. La machine fonctionne lors de la croissance du champ appliqué, mais doit fonctionner à vide à la décroissance. Cette méthode est aujourd'hui dépassée, car si on avait conservé ce principe, les accélérateurs de particules modernes devraient être pourvus d'électroaimants ayant une masse de plusieurs millions de tonnes.

Les accélérateurs circulaires modernes appelés synchrophasotrons, assurent l'accélération complète des particules sur une seule orbite.

De ce fait toute la partie centrale de l'aimant peut être éliminée. Ces machines fonctionnent aussi en régime d'impulsion. On fait varier simultanément l'intensité du champ magnétique et la période du champ électrique. Les particules « accordées » seront accélérées sur une orbite rigoureusement circulaire, tandis que les autres oscilleront autour de l'orbite de travail tout en accroissant leurs vitesses.

En principe, la vitesse des particules peut atteindre des valeurs fantastiques; par exemple, on arrive à conférer aux protons des vitesses à peine inférieures à la vitesse de la lumière.

Il nous reste à expliquer à quoi sert toute cette machinerie. On construit les accélérateurs de particules pour étudier la physique des particules élémentaires. Plus grande est l'énergie des particules chargées utilisées en qualité de projectiles bombardant des cibles, plus grande est la probabilité de préciser les lois des transmutations mutuelles des particules élémentaires.

En gros, on peut dire que le monde a été construit avec trois espèces de particules: électrons, protons et neutrons. Jusqu'ici rien ne permet de supposer que l'électron soit une particule complexe. Quant au neutron et au proton, on arrive à les scinder; lorsque les fragments entrent en collision ils forment de nouvelles particules; aujourd'hui on dénombre près de 250 particules et le nombre ne cesse de croître à mesure que la puissance des accélérateurs mis en action augmente. Néanmoins les physiciens spécialisés dans l'étude des particules élémentaires ne perdent pas l'espoir de dresser un équivalent du tableau de Mendéléev pour les particules élémentaires et de les réduire à un petit nombre de « protoparticules », comme auparavant on avait réduit une centaine d'éléments et plusieurs centai-

nes d'isotopes à des combinaisons d'électrons, de protons et de neutrons.

Mais que signifie alors la proposition donnée plus haut : le monde a été construit avec trois espèces de particules ? Cette assertion est fondée sur les considérations suivantes. Seuls l'électron et le proton sont des particules parfaitement stables ; le neutron, lui, n'est pas parfaitement stable, en entendant ce mot dans sa signification courante. A l'échelle du microcosme, le temps de vie du neutron est énorme puisqu'il est égal à 10^3 s environ. Le temps de vie de la plupart des autres particules qui causent tant de soucis aux théoriciens, est inférieur à 10^{-6} s. On conçoit que ces deux chiffres sont très différents.

Il est cependant souhaitable de systématiser ces fragments de matière de durée de vie très courte. On a réalisé plus d'un système de classification des particules élémentaires, mais chaque fois qu'un nouvel accélérateur de plus grande puissance entrait en action, on découvrait de nouveaux phénomènes qui étaient en désaccord avec les systèmes existants.

Actuellement, les spécialistes font preuve d'optimisme. Il paraît qu'on arrive à ramener l'ensemble des particules élémentaires à des « protoparticules » que l'on dénomma quarks. Mais malheureusement on n'a jamais observé aucun quark et il est probable qu'ils soient inobservables par principe. Pour dresser sur cette base un système de classification des particules élémentaires, on est obligé d'attribuer au quark, d'une part, une charge électrique valant un tiers ou deux tiers de la charge de l'électron, et d'autre part, deux autres paramètres qu'on ne peut visualiser : « étrangeté » et « charme » *).

*) Récemment on a été amené à leur adjoindre un nouveau paramètre qu'on dénomma « beauty ».

Nous n'avons pas l'intention de nous attarder ici sur les problèmes que pose la physique des particules élémentaires, et ce n'est pas parce qu'il est difficile d'exposer de façon compréhensible les schémas existants, mais parce qu'il est prématuré d'être certain de leur charme et de leur beauté. Il n'est nullement exclu qu'apparaissent d'autres conceptions, d'autres approches à l'étude de ces minuscules portions de l'Univers, dont la taille donnée en centimètre est égale au quotient de l'unité par l'unité suivie de 13 zéros.

MÉCANIQUE ONDULATOIRE

En 1923, le physicien français Louis de Broglie écrivait dans une thèse magistrale: « En optique, pendant des siècles, on négligea trop l'aspect corpusculaire au profit de l'aspect ondulatoire de la lumière. Est-ce qu'on ne commettrait pas l'erreur inverse en théorie des microparticules? » De Broglie indiqua la voie à suivre pour attribuer aux particules des concepts ondulatoires.

L'œuvre de L. de Broglie a été développée par le physicien allemand Erwin Schrödinger. Dans les années 1926-1927, il devint évident que mécanique ondulatoire et mécanique quantique étaient des termes somme toute équivalents. Cette nouvelle mécanique est la partie de la Physique qui est consacrée aux procédés d'étude du comportement des microparticules lorsque ni l'approche corpusculaire ni l'approche ondulatoire prises séparément ne donnent de résultats satisfaisants.

Nous avons déjà mis le lecteur en garde de ne pas comprendre trop littéralement le terme « onde électromagnétique ». Le rayonnement radioélectrique, la lumière et les rayons X peuvent être

envisagés sous deux aspects différents: l'aspect ondulatoire et l'aspect corpusculaire. La même assertion vaut pour les flux de particules. Quoique les flux de particules diffèrent nettement des rayonnements électromagnétiques (la principale différence est que les électrons, les noyaux, les neutrons et les ions peuvent se déplacer à n'importe quelle vitesse, tandis que les photons ne se déplacent qu'à la vitesse de 300 000 km/s), ils manifestent suivant les expériences tantôt des propriétés corpusculaires, tantôt des propriétés d'onde.

Quelle longueur d'onde doit-on attribuer à une particule en mouvement? A l'aide de raisonnements que nous exposerons ci-après sous une forme simplifiée, de Broglie indiqua à quoi devrait être égale la longueur d'onde associée à un flux de particules.

Reprenons les relations fondamentales établissant des liens entre les aspects corpusculaire et ondulatoire du rayonnement électromagnétique. Le photon transporte une portion d'énergie électromagnétique égale à $E = h\nu$. L'énergie du photon, comme de toute autre portion de matière, doit satisfaire à l'équation d'Einstein; on peut donc représenter l'énergie du photon par la formule $E = mc^2$. Il s'ensuit que la masse du photon *) $m = h\nu/c^2$. En multipliant la masse par la vitesse, on trouve l'impulsion du photon:

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

*) La masse du photon est la masse d'une particule en mouvement; la masse au repos du photon est pratiquement nulle; selon les données expérimentales, elle est inférieure à $0{,}6 \cdot 10^{-20}$ MeV. On notera que l'expression donnant l'impulsion du photon peut être directement vérifiée par mesure de la pression de la lumière.

Mais nous désirons connaître la longueur d'onde d'une particule dont la masse au repos est différente de zéro. Il faut admettre pour cela que les développements ci-dessus restent valables et que la relation entre l'impulsion et la longueur d'onde est universellement valable! Il suffit donc de récrire la formule sous la forme

$$\lambda = \frac{h}{mv} .$$

C'est la fameuse formule de de Broglie qui montre que l'aspect ondulatoire d'un flux de particules doit se manifester d'autant plus nettement que la masse et la vitesse de la particule sont petites. Cette conclusion est confirmée par l'expérience: la diffraction des électrons et des neutrons lents s'observe aisément.

Pour faire la preuve de la justesse de ces considérations, qui, à l'époque, étaient traitées de manipulations de notions, il suffit de relever les diagrammes de diffraction des rayons X, des électrons et des neutrons d'une seule et même substance. En réglant les vitesses des électrons et des neutrons de façon que toutes les longueurs d'onde soient égales, on doit obtenir des diagrammes de Debye identiques (anneaux de diffraction de même diamètre). C'est ce qu'on observe effectivement.

C'est par hasard qu'en 1927 la formule de de Broglie reçut une première vérification expérimentale. Davisson et Germer, physiciens américains, procédaient à des expériences de diffusion des électrons par les surfaces métalliques, et une fois ils portèrent le métal à incandescence. L'échantillon qui était polycristallin subit au chauffage une recristallisation, de sorte qu'après ce traitement les électrons étaient diffusés par un monocristal. Le diagramme obtenu ressem-

10—01221

blait tellement aux diagrammes de diffraction des rayons X qu'il ne subsistait aucun doute de ce que les électrons sont susceptibles de diffraction exactement comme les rayons X.

Assez rapidement la diffraction des électrons devint une méthode d'étude de la structure des substances qui, dans de nombreux cas, était préférable aux méthodes de la radiocristallographie classique. Le principal domaine d'application de la diffraction des électrons est l'étude de la structure des couches minces. Les principes en sont les mêmes que ceux que nous avons exposés au chapitre 3, toute la différence étant que les rayons électroniques sont diffusés par les électrons et les noyaux, tandis que les rayons X ne le sont que par les électrons.

Comme la longueur d'onde des particules est inversement proportionnelle à leur masse, il est difficile d'observer la diffraction des molécules et jusqu'à présent personne ne réussit à le faire. On peut observer la diffraction des protons mais elle ne présente aucun intérêt pour la raison qu'elle ne convient pas pour l'étude des structures volumiques, du fait de la faible profondeur de pénétration des protons, et pour l'étude des surfaces il est préférable d'avoir recours à la diffraction des électrons qui fournit beaucoup plus d'informations.

La situation est toute autre avec les neutrons. La diffraction des neutrons (diffractométrie neutronique) fait l'objet de nombreuses études.

La technique d'obtention des neutronogrammes est beaucoup plus délicate que celle des diagrammes aux rayons X. Notons tout d'abord qu'on ne peut obtenir un faisceau assez dense de neutrons ayant une longueur d'onde appropriée (ce qui implique une vitesse déterminée des neutrons) qu'en les extrayant à travers un canal spé-

cial d'une pile atomique. Une autre difficulté tient à ce que la diffusion des neutrons est petite: les neutrons traversent facilement les substances sans entrer en collision avec les noyaux des atomes. On doit donc travailler avec des cristaux assez gros (dimensions linéaires de l'ordre de 1 cm) qu'il n'est pas toujours facile à obtenir. Il existe encore une troisième cause de difficulté qui tient à ce que les neutrons n'impressionnent pas les plaques photographiques et dans les détecteurs à ionisation ils ne manifestent leur présence que de façon indirecte. Dans ce qui suit on expliquera comment on fait pour compter les neutrons.

Pour quelles raisons utilise-t-on la diffraction des neutrons? A la différence des rayons X, les neutrons ne sont pas diffusés par les électrons et ne sont déviés que lorsqu'ils rencontrent des noyaux sur leurs trajets. Il existe de nombreuses substances dont les atomes ne se distinguent que peu par le nombre d'électrons, mais diffèrent grandement par les propriétés de leurs noyaux. Dans ces cas, les rayons X n'arrivent pas à distinguer les atomes d'espèces différentes, tandis que les neutrons y arrivent parfaitement. Mais la cause principale du succès de la neutronographie est que les neutrons sont fortement diffusés par les noyaux des atomes d'hydrogène, tandis que les rayons X n'arrivent à les localiser qu'à grand-peine, chacun de ces atomes ne possédant qu'un seul électron. Or il est important de connaître l'emplacement des atomes d'hydrogène, car dans une multitude de systèmes organiques et biologiques, l'atome d'hydrogène sert de lien entre les parties d'une même molécule ou entre les molécules voisines. Ce type de liaison est appelé liaison d'hydrogène. D'autre part, la méthode de la diffraction des neutrons est la seule qui permette de distinguer nettement les noyaux

ayant des propriétés magnétiques différentes. Pour toutes ces raisons la méthode de la diffraction des neutrons est devenue un important outil d'étude de la structure des substances.

PRINCIPE DE HEISENBERG

Pendant longtemps de nombreux physiciens n'arrivaient pas à admettre que la lumière et les particules puissent posséder simultanément des propriétés corpusculaires et ondulatoires. Ils s'imaginaient que cette dualité était contraire à la théorie de la connaissance ; mais c'est le principe énoncé par Heisenberg qui leur paraissait le plus révoltant.

Ce principe essentiel pour la physique du microcosme établit les limites de validité de l'approche corpusculaire de tous les phénomènes liés au mouvement des particules d'une substance quelconque. Le principe de Heisenberg s'exprime par l'inégalité

$$\Delta x \Delta v > \frac{h}{m},$$

où Δx et Δv représentent les indéterminations sur les valeurs de la coordonnée et de la vitesse (le long de cette même coordonnée) de déplacement de l'amas de matière que nous assimilons à un corpuscule.

Notons qu'il ne s'agit nullement de difficultés techniques dans la mesure de ces grandeurs. La relation ci-dessus établit un lien entre les indéterminations qui subsisteraient même dans une expérience idéale. Actuellement, les divers schémas avancés pour réaliser des mesures parfaitement exactes des trajectoires et des vitesses des particules ne présentent qu'un intérêt historique. Une analyse minutieuse de chacun de ces

schémas permet d'y déceler des défauts de principe.

Essayons d'expliquer en peu de mots pourquoi aucune expérience ne peut assurer une précision supérieure à celle qu'impose le principe de Heisenberg. Supposons qu'il s'agisse de déterminer la position d'une particule dans l'espace. Pour savoir où elle se trouve il faut l'éclairer. On sait que les possibilités de discerner des détails de l'objet observé dépendent de la longueur d'onde des radiations utilisées. Plus la longueur d'onde est petite, plus l'examen sera détaillé, mais à mesure que la longueur d'onde diminue, la fréquence de la lumière augmente et par suite l'énergie du photon augmente. Le choc que subit la particule observée de la part du photon incident ne nous permettra pas de connaître la vitesse qu'elle avait avant le choc.

Un autre exemple classique est le suivant. On place un écran muni d'une fente étroite sur le trajet d'un électron. Après avoir traversé la fente, l'électron tombe sur un écran luminescent et produit un éclair à son point d'impact. Ainsi, à la largeur de la fente près, on détermine la position de l'électron à l'instant où il traverse la fente. Essayons d'accroître la précision de cette mesure en diminuant la largeur de la fente. La fente devenant de plus en plus étroite, les propriétés ondulatoires de l'électron se manifestent plus nettement (voir p. 65) et l'électron subit des déviations de plus en plus fortes par rapport à la trajectoire rectiligne. Or cela signifie que les informations concernant la composante de la vitesse de l'électron contenue dans le plan de la fente seront toujours moins précises.

On peut imaginer des dizaines d'expériences de ce type et les analyser quantitativement (c'est ce que faisaient les physiciens dans les années

trente) ; dans tous les cas, on sera ramené à la formule de Heisenberg.

Procédons à une estimation des valeurs de Δx et Δv que l'on peut faire pour des particules de masses différentes à l'aide de la formule de Heisenberg.

Considérons d'abord un électron appartenant à un atome. Est-il possible de réaliser une expérience qui permettrait de déterminer où se trouve l'électron à un instant donné? Comme les dimensions de l'atome sont de l'ordre de 10^{-8} cm, il faudrait que la précision de cette détermination soit d'au moins 10^{-9} cm. En principe, on pourrait réaliser une telle expérience, mais il faut estimer à l'aide de la formule la perte d'information qui en résulterait. Pour l'électron le rapport h/m vaut environ 7 cm²/s et la relation de Heisenberg est $\Delta x\, \Delta v > 7$, d'où $\Delta v > 7 \cdot 10^9$ cm/s; ce résultat étant absurde, on ne sait rien de la vitesse de l'électron.

Essayons maintenant de préciser la valeur de la vitesse de l'électron dans l'atome. On peut imaginer pour cela une expérience réalisable en principe, mais alors on ne saura plus rien de la position de l'électron.

L'inégalité appliquée à l'électron atomique montre que dans ce cas l'approche corpusculaire n'est pas valable. La notion de trajectoire électronique est dénuée de sens et on ne sait rien des trajets qu'emprunte l'électron pour passer d'un niveau d'énergie sur un autre.

La situation devient différente lorsqu'on s'intéresse aux mouvements des électrons dans les chambres d'ionisation, où la trace de l'électron est visible. Cela signifie que l'électron possède une trajectoire. Et qu'advient-il du calcul ci-dessus ? Ce sont des situations totalement différentes et il faut reprendre à zéro tous les raisonne-

ments. La largeur de la trace visible est égale à 10^{-2} cm environ; par conséquent, l'indétermination sur la vitesse d'un électron même lent qui traverse la chambre avec une vitesse proche de 1 km/s est pratiquement négligeable devant cette valeur puisqu'elle est égale à 7 m/s.

Ces exemples numériques montrent que l'aspect corpusculaire s'estompe dès qu'on cherche à scruter plus en détail une portion de matière donnée.

On dit souvent particules en parlant des protons et des neutrons. Mais lorsqu'il s'agit de leur comportement dans le noyau atomique, dont la dimension est de 10^{-13} cm, on ne peut y discerner un aspect corpusculaire.

Une estimation facile à faire montre que lorsqu'il s'agit d'une grosse molécule dont la masse moléculaire est de l'ordre de un million, on peut l'assimiler à une petite bille, car ces molécules se comportent comme de vraies particules. On peut, par exemple, représenter la trajectoire de son mouvement thermique qui est chaotique.

Les temps sont révolus où la dualité onde-corpuscule semblait surprenante et appelait une interprétation approfondie. Des savants aussi éminents qu'Einstein et Bohr discutaient âprement la question de l'interprétation de ce comportement « étrange » des électrons et des autres particules. De nos jours la grande majorité des spécialistes des sciences de la Nature utilisent couramment les deux approches pour décrire des phénomènes différents où interviennent les électrons, les noyaux ou les photons.

Il y a une dizaine d'années, un groupe d'épistémologues se livra à une enquête parmi les physiciens (près de 10 000 physiciens ont été interviewés). Parmi différentes questions on posait

la question suivante: estimez-vous que la question de la dualité onde-corpuscule est intérossante et n'est pas élucidée complètement? Vingt personnes seulement étaient d'avis qu'en dernière instance l'inégalité de Heisenberg et les questions connexes ne représentent pas la vérité.

Les personnes qui ne pouvaient se résoudre à reconnaître le bien-fondé de cette importante loi de la Nature fondaient leur réprobation sur la proposition suivante: « Je ne peux admettre que le comportement d'une particule de matière serait imprévisible ». Dans cette proposition on donnait au terme « particule de matière » la signification qu'on lui donne dans la vie courante. Or une portion de matière qu'elle s'appelle lumière, ondes radio, électron ou noyau, ne ressemble en rien à un grain. N'importe qui conçoit qu'on ne peut pas visualiser une particule de matière, puisqu'en parlant d'électrons ou de protons on ne peut utiliser les notions de couleur, de densité, de température, ces notions n'étant applicables qu'aux corps macroscopiques. Ne pouvant pas visualiser une portion de matière, à fortiori on ne peut imaginer quel peut être son mouvement. Le mouvement d'une portion de matière implique la coexistence des aspects ondulatoire et corpusculaire. Le comportement de l'un seulement de ces deux aspects est imprévisible.

La mécanique quantique (ou mécanique ondulatoire; il s'agit de deux dénominations d'une seule théorie) fournit un ensemble de règles simples permettant de prévoir le comportement d'une portion de matière. La description des particules par les méthodes de la mécanique quantique réfléchit correctement les lois qui régissent le microcosme. La mécanique quantique prédit de façon infaillible les événements et trouve des applications pratiques toujours plus nombreuses.

Cela ne signifie nullement qu'on ne découvrira pas des lois de la Nature plus générales dont un cas particulier sera la mécanique quantique, comme cela s'est produit avec la mécanique de Newton. Ces lois générales devront permettre de décrire le comportement des particules de petite masse animées de très grandes vitesses. On attend avec impatience et déjà depuis longtemps que soit élaborée une théorie qui englobe dans un seul corps toutes les mécaniques. Cette théorie, qui n'a pas encore été élaborée, a déjà été baptisée mécanique quantique relativiste.

On est surpris de constater que l'avalanche de découvertes, qui furent faites au cours du premier quart du XXe siècle, cessa brusquement. Que le lecteur ne s'étonne pas, il en est bien ainsi. L'extraordinaire essor des sciences et le développement rapide de la révolution scientifique et technique qui durent depuis près de cinquante ans déjà ne peuvent cacher le fait que depuis la découverte de la mécanique quantique aucune nouvelle loi de la Nature n'a été découverte. Il faut attendre.

CHAPITRE 5

STRUCTURE DES NOYAUX ATOMIQUES

LES ISOTOPES

Dans le livre 3, nous avons expliqué qu'à l'aide de champs électriques et magnétiques on pouvait séparer en plusieurs faisceaux un faisceau initial composé de particules caractérisées par des valeurs différentes du rapport de la charge à la masse. Dans le cas où les charges seraient égales, on arrive à trier les particules selon leurs masses. On utilise pour cela un appareil appelé spectrographe de masse, qui trouve de nombreuses applications en analyse chimique.

Le schéma de l'appareil est représenté sur la figure 5.1. L'idée de base est la suivante. On envoie des particules animées de vitesses différentes dans le champ électrique d'un condensateur. Isolons par la pensée un groupe de particules caractérisées par une même valeur du rapport e/m. Lorsque le flux de ces particules pénètre dans le champ électrique, il se trouve étalé, les particules rapides étant déviées par le champ électrique plus faiblement que les particules plus lentes. Ce flux étalé est alors soumis à l'action d'un champ magnétique perpendiculaire au plan de la figure. Ce champ est orienté de façon à dévier les particules en sens inverse aux déviations qu'elles subirent dans le champ électrique. Comme les particules rapides y sont moins déviées que les particules lentes, au-delà des limites de ce champ le groupe considéré se rassemblera en un point, i.e. subira une focalisation.

Les particules ayant une autre valeur du rapport e/m seront elles aussi rassemblées en un

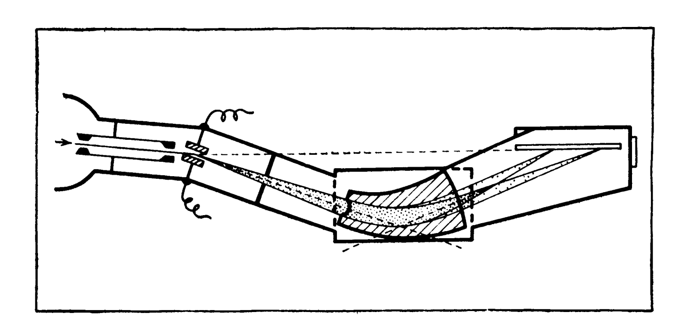


Fig. 5.1

point, mais ce sera un point distinct du premier. Le calcul montre que les foyers correspondant à toutes les valeurs possibles du rapport e/m se disposent très près d'une certaine droite. En disposant une plaque photographique suivant cette droite, les particules d'espèces différentes y laisseront des traces de leur présence sous forme de raies.

C'est cet appareil qui a permis à J. J. Thomson de découvrir, en 1912, l'existence d'isotopes. C'est en étudiant la déviation d'un faisceau d'ions néon par les champs électriques et magnétiques qu'il nota que le faisceau se scindait en deux. La masse atomique du néon (plus exactement sa masse atomique relative) était connue avec une précision satisfaisante: 20,200. Il s'avéra qu'il existait trois sortes d'atomes de néon dont les nombres de masse étaient égaux à 20, 21, 22 (les nombres de masse sont les masses atomiques relatives arrondies à un nombre entier).

Comme les propriétés chimiques du néon étaient indépendantes de sa masse, les physiciens s'assurèrent bientôt que les différences observées n'étaient liées qu'au noyau. Puisque la charge du noyau est égale au nombre d'électrons, les diffé-

rentes sortes d'atomes de néon doivent occuper la même case du tableau de Mendéléev. C'est pour cette raison que les différentes sortes d'atomes d'un même élément sont appelées isotopes, ce qui signifie occupant la même place.

Dans les années vingt, le spectrographe de masse fut modernisé et on commença l'étude de la composition isotopique de tous les éléments. Tous les éléments, sans aucune exception, sont des mélanges d'isotopes. Il existe des éléments, par exemple l'hydrogène et l'oxygène, qui se composent pour l'essentiel d'un seul isotope (à 99,986 % pour l'hydrogène de nombre de masse 1, et à 99,76 % pour l'oxygène de nombre de masse 16). Mais il existe des éléments avec des proportions d'isotopes différentes, par exemple le chlore avec 75 % d'isotope de nombre de masse 35 et 25 % d'isotope de nombre de masse 37. Il y a aussi des éléments composés d'un grand nombre d'isotopes. Les exemples cités sont ceux d'isotopes stables. Nous verrons plus tard les isotopes radioactifs qui sont instables et qui subissent des désintégrations radioactives.

En un espace de temps court, les performances des spectrographes de masse progressèrent à un point tel qu'on put établir que les masses des isotopes ne s'expriment par des nombres entiers qu'à deux ou quatre décimales près. On expliquera dans ce qui suit l'origine de ces écarts.

Comme la masse du noyau n'affecte pas le comportement chimique des atomes, il existe de nombreuses combinaisons chimiques qui diffèrent entre elles par leur composition isotopique. On dit généralement qu'il existe deux sortes d'eau — l'eau ordinaire et l'eau lourde. L'eau ordinaire contient l'isotope d'hydrogène de nombre massique 1, et l'eau lourde contient l'isotope d'hydrogène de nombre de masse 2. Or on trouve

dans la Nature trois isotopes d'oxygène de nombres de masse 16, 17 et 18; il s'ensuit que l'eau est un mélange de six types de molécules. Lorsque les molécules d'une substance comportent un grand nombre d'atomes, le nombre de variétés isotopiques peut atteindre plusieurs dizaines ou plusieurs centaines.

La séparation des isotopes constitue un secteur industriel important et intéresse surtout les techniques de production d'énergie atomique. On doit pouvoir séparer l'eau lourde de l'eau légère, trier les atomes des différents combustibles nucléaires — uranium, thorium. On pourrait dresser une longue liste des tâches que l'industrie impose aux physiciens.

La difficulté que présente la séparation des isotopes tient à ce que les structures électroniques des atomes des différents isotopes ne se distinguent que fort peu; il en est de même pour les propriétés chimiques. Pour les atomes légers, on arrive, quoique difficilement, à réaliser des extractions chimiques qui, répétées un grand nombre de fois, assurent la séparation des isotopes. Pour la séparation des isotopes d'atomes lourds, on fait appel à des méthodes physiques fondées sur les petites différences de masse des noyaux.

Aujourd'hui on utilise surtout la méthode de diffusion des gaz au travers d'une paroi poreuse: les vitesses de diffusion des molécules lourdes sont plus petites que celles des molécules légères.

On peut utiliser pour la séparation des isotopes la spectrographie de masse. Ces deux procédés sont lents et onéreux.

Il y a quelques ans, on élabora un procédé inédit de séparation des isotopes fondé sur l'utilisation des lasers. Les potentialités des lasers pour la séparation des isotopes résultent de ce qu'on peut réaliser un rayonnement laser presque par-

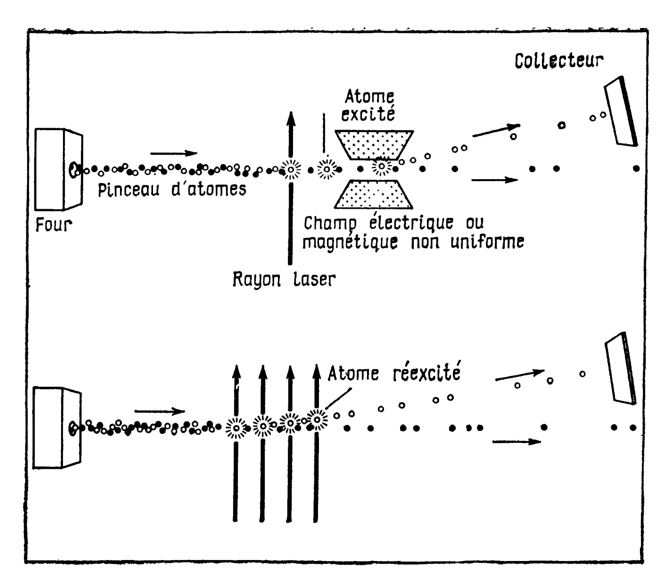


Fig. 5.2

faitement monochromatique. La différence entre les distances de séparation des niveaux d'énergie occupés par les électrons de deux isotopes d'un élément chimique donné est extrêmement petite, puisqu'elle n'est déterminée que par la différence de masse des noyaux, leurs charges étant égales. Or les positions des niveaux électroniques dépendent surtout des charges. Le degré de monochromaticité du rayon laser est tel qu'il excite les atomes de l'un des isotopes, les atomes de l'autre ne l'étant pas.

La figure 5.2 représente les schémas de principe de deux procédés de séparation des isotopes par le rayonnement laser. Un pinceau d'atomes ou de molécules sortant de l'ouverture d'un four est irradié par un rayonnement laser. Celui-ci

n'excite que les atomes de l'un des isotopes. En général les atomes excités possèdent un moment électrique ou magnétique et peuvent donc être entraînés par un champ électrique ou magnétique non uniforme (schéma du haut).

L'autre procédé est mis en œuvre lorsque le temps de vie des atomes excités est très court. En passant dans la partie de l'espace éclairée par le rayonnement laser, un seul et même atome est réexcité plusieurs fois de suite sous l'action des chocs inélastiques avec les photons. Chaque fois qu'il absorbe un photon, l'atome acquiert une impulsion dans le sens de propagation du rayon laser. Les atomes excitables sont repoussés vers le haut, tandis que les atomes de l'isotope non excité se propagent en ligne droite.

Dans la première expérience réussie on utilisait un jet d'atomes de baryum irradié par une radiation laser de longueur d'onde égale à 0,55535 μm. L'absorption d'un photon déplaçait l'atome de 0,8 cm pendant 1 s, pour une vitesse longitudinale de 50 000 cm/s.

LA RADIOACTIVITÉ

Dans le livre 3, on exposa à la suite de quelles expériences Rutherford réussit à établir que l'atome était constitué d'un noyau minuscule autour duquel gravitaient des électrons. Ici le lecteur s'initiera aux résultats d'importance capitale pour toute la Physique, qui démontrent que les noyaux atomiques se composent de protons et de neutrons. Curieusement, l'histoire de cette découverte débuta quinze ans avant que Rutherford démontrât la validité du modèle planétaire de l'atome à l'aide de ses expériences de diffusion des rayons alpha par une mince feuille métallique.

Au printemps 1896, le physicien français Henri Becquerel (1852-1908) remarqua que l'uranium émettait un rayonnement provoquant des effets semblables à ceux des rayons X. Tout comme les rayons X, qui venaient d'être découverts, le rayonnement émis par l'uranium impressionnait les plaques photographiques vierges enveloppées de papier noir (i.e. traversait des objets opaques). Becquerel constata que l'absorption de ces rayons était proportionnelle à la densité de l'objet interposé entre l'uranium et la plaque photographique. Si l'objet était opaque pour ces rayons, la plaque enregistrait le contour de l'objet. Le rayonnement de l'uranium, tout comme les rayons X, ionisait l'air et par mesure du degré d'ionisation on pouvait juger de l'intensité de ce rayonnement.

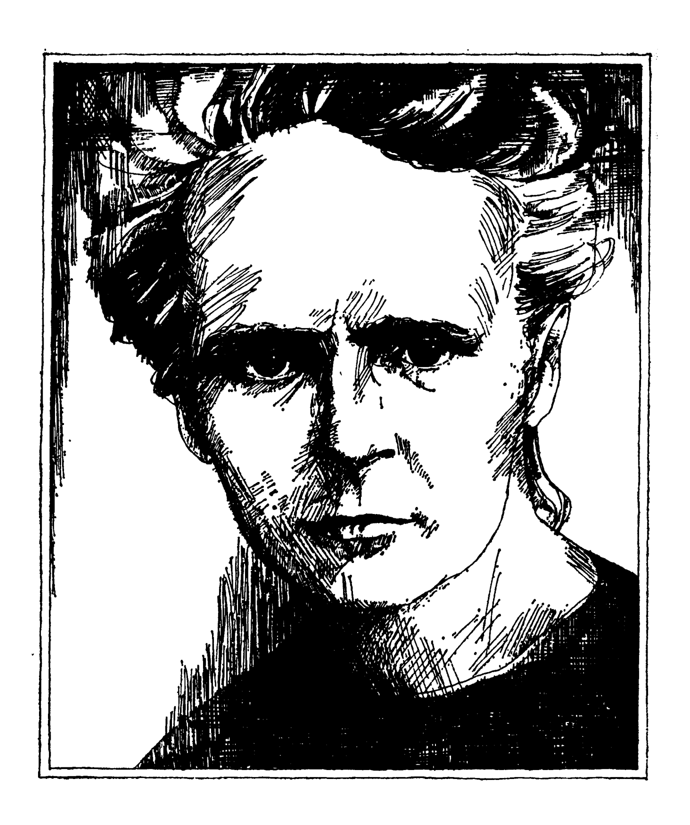
Ce qui apparente les découvertes de Röntgen et de Becquerel c'est qu'elles furent toutes deux fortuites. Mais le hasard seul n'est jamais à l'origine d'une importante découverte. De même qu'après la découverte de Röntgen différentes personnes signalèrent qu'elles avaient « vu » un rayon X, après la découverte de Becquerel il s'est trouvé au moins trois personnes qui avaient déjà noté le noircissement des plaques photographiques qui avaient séjourné à proximité de sels d'uranium. Mais il ne suffit pas de « voir » ou de « noter », il faut s'attacher à découvrir la cause véritable du phénomène. C'est ce que firent Röntgen et Becquerel et non pas ceux qui avaient simplement « vu » l'effet et c'est pour cela qu'ils recueillirent à juste titre la gloire de ces découvertes.

La voie que suivit Becquerel pour arriver à sa découverte comportait plusieurs étapes successives. Nous avons signalé que dans les premiers tubes à rayons X les rayons cathodiques tombaient

sur le verre et provoquaient sa fluorescence. Ce fait donnait à penser que les rayons pénétrants accompagnaient la fluorescence. C'est pour cela que Becquerel commença à faire des expériences avec des substances qui devenaient fluorescentes à la lumière solaire. Il constata assez rapidement que les rayons pénétrants étaient émis par des minerais contenant de l'uranium ; c'était déjà une découverte. Mais Becquerel ne se dépêcha pas d'en faire état dans une publication, car il fallait répéter les expériences. Or, comme par hasard, pendant plusieurs jours le temps était couvert ; pendant ces quelques jours, les plaques photographiques et les minerais attendaient le soleil dans un tiroir. Le premier mars 1896, le soleil était au rendez-vous et on pouvait recommencer les expériences. Mais avant, Becquerel voulut s'assurer de la bonne qualité de ses plaques photographiques. Il en développa une et il y aperçut les contours nettement profilés des échantillons de minerais. Or la fluorescence était absente et elle ne jouait donc aucun rôle dans le phénomène.

Becquerel recommença les expériences dans l'obscurité et constata que les minerais émettaient un rayonnement pénétrant qui était d'origine spontanée, sans aucune intervention de la lumière extérieure.

Un examen méticuleux d'un grand nombre d'échantillons de minerais suggéra à Becquerel l'idée que c'était l'uranium qui était la source des rayons. Les minerais qui ne contenaient pas d'uranium n'émettaient aucun rayonnement. Pour en faire la preuve, il fallait étudier de l'uranium pur qui était très rare à l'époque. Becquerel s'adressa à son ami Moissan, qui lui en donna. A une même réunion de l'Académie des sciences française, le 23 novembre 1896, Moissan décrivit



MARIE SKLODOWSKA-CURIE (1867-1934). Femme savante éminente. En 1898, au cours d'une étude du rayonnement qu'émettaient l'uranium et le thorium (la nature de ce rayonnement était inconnue à l'époque) elle constata que les minerais de ces éléments contenaient des substances qui émettaient des rayonnements d'une intensité beaucoup plus grande. Elle isola le polonium et le radium. Marie Curie et son mari Pierre Curie forgèrent le terme « radioactivité ». Les découvertes de Marie Sklodowska-Curie furent aussitôt mises à l'étude par Rutherford et c'est ce dernier qui établit la loi de la désintégration radioactive des atomes.

son procédé d'obtention de l'uranium pur et Becquerel communiqua que l'uranium émettait un rayonnement. Cinquante ans après cette découverte une bombe atomique tombait sur Hiroshima.

Une année plus tard, en automne 1897, deux jeunes physiciens, les époux Curie, commençaient leurs recherches. Ces jeunes gens pleins d'enthousiasme travaillaient dans une baraque non chauffée. Marie Curie (1867-1934) a pris pour sujet de sa thèse de doctorat l'étude des propriétés chimiques particulières des échantillons de minerais émettant le rayonnement pénétrant de Becquerel.

Leur travail acharné a pour résultat plusieurs découvertes. Ils établissent d'abord que le thorium tout comme l'uranium émet des rayons pénétrants, et déterminent leur intensité par mesure du courant d'ionisation. Pierre Curie confirme l'hypothèse de Becquerel que l'intensité des rayons pénétrants ne dépend pas de la nature des composés dont fait partie l'uranium ou le thorium, n'étant proportionnelle qu'au nombre d'atomes de ces éléments.

Et brusquement, un fait imprévu : le minerai pechblende provoque une ionisation quatre fois plus grande que celle que l'on devrait observer d'après sa teneur en uranium. C'est dans ces moments cruciaux que se manifeste le talent de chercheur. Un autre chercheur aurait supposé que ce résultat était le fait des atomes d'uranium, mais Marie Curie admet une autre éventualité. Il n'est nullement exclu que la pechblende contienne une petite quantité d'un élément chimique encore inconnu, émettant un rayonnement pénétrant de très grande intensité. Cette hypothèse s'avère exacte. Marie Curie se livre à un travail ardu pour isoler d'abord l'élément polonium (Marie Curie, né Sklodowska était de nationalité

polonaise) puis l'élément radium. Ce dernier était presque mille fois plus actif que l'uranium pur.

Sans nous soucier davantage des réminiscences historiques, indiquons qu'après la découverte du radium on découvrit d'autres substances émettant des rayons pénétrants. Toutes ces substances ont été dénommées radioactives.

Qu'est-ce que le rayonnement radioactif? Plaçons l'échantillon radioactif dans une boîte hermétique d'où on évacue tout l'air. A côté de la boîte disposons un écran de plomb percé d'une fente. Le rayonnement émis passe à travers la fente, tombe sur une plaque photographique et y laisse une trace en forme de raie. Si on place la boîte entre les pôles d'un aimant, on verra sur la plaque, après développement, trois raies bien distinctes. Le rayonnement radioactif a été scindé en trois faisceaux: l'un est dévié dans un sens correspondant à des particules chargées négativement, le second est composé de particules chargées positivement, le troisième faisceau qui ne subit aucune déviation, est de même nature que les rayons X.

A l'aide de méthodes, dont il a été déjà question on démontre que dans le cas général, le rayonnement radioactif se compose d'un flux d'électrons (avant qu'on sut qu'il s'agissait d'un flux d'électrons cette partie de rayonnement était appelée rayonnement β (bêta)), d'un flux de noyaux d'atomes d'hélium (particules α (alpha) ou hélions) et d'un rayonnement électromagnétique dur (rayons gamma).

LES DÉSINTÉGRATIONS RADIOACTIVES

Les atomes qui émettent le rayonnement radioactif sont le siège de phénomènes extraordinaires. En 1902, Rutherford (qui établit en 1911

la structure de l'atome) démontre que l'émission des rayonnements radioactifs s'accompagne de la transformation d'atomes d'une espèce en des atomes d'une espèce différente.

Rutherford s'attendait à ce que son hypothèse, quoique solidement étayée par des expériences rigoureuses, soit rejetée par les chimistes. En effet, en démontrant la convertibilité des atomes, on s'attaque au principe sacro-saint de l'insécabilité de l'atome. Affirmer qu'à partir de l'uranium on obtient du plomb, c'est raviver le vieux rêve des alchimistes, dont la renommée n'était pas meilleure que celle des astrologues.

Mais les adversaires de Rutherford s'inclinèrent devant des preuves irréfutables et quelque temps après le phénomène de la désintégration radioactive spontanée de certaines espèces d'atomes fut démontré par des méthodes chimiques et physiques. Voyons en quoi consistent les transmutations radioactives.

On constate tout d'abord que les rayons électroniques faisant partie du rayonnement radioactif sont émis par le noyau. Cela implique que la charge du noyau augmente d'une unité et que l'atome radioactif se transforme en un atome de l'élément qui suit l'élément initial dans la classification périodique.

Une particule α porte une double charge positive et possède une masse quatre fois plus grande que la masse de l'atome d'hydrogène. Lorsque les noyaux éjectent des particules α les atomes qui se forment retrogradent dans le tableau de Mendéléev en subissant des transformations isotopiques convenables.

Il est trivial de dire que ce sont les atomes instables qui subissent des désintégrations radioactives.

Nous ne savons pas combien d'espèces d'ato-

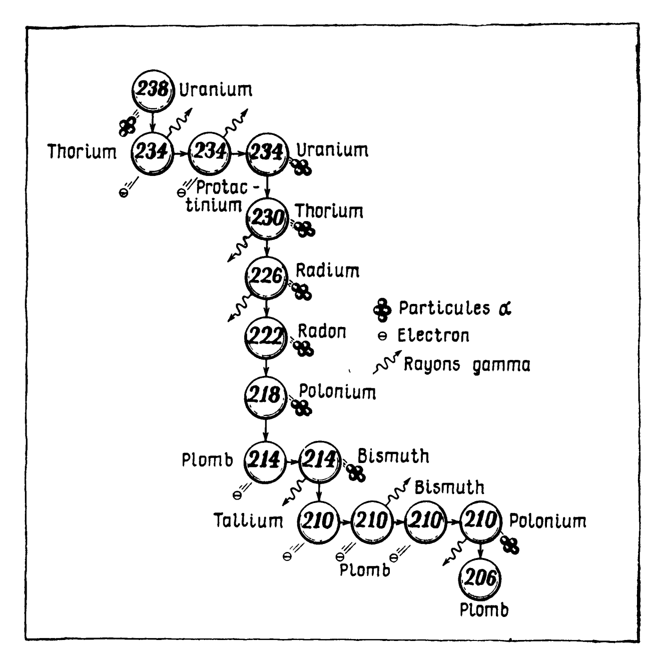


Fig. 5.3

mes instables y avait-il sur Terre lorsque le globe commença à se refroidir, mais nous savons très bien quels atomes instables on peut trouver dans la Nature aujourd'hui. Les éléments radioactifs naturels se groupent en trois familles. Les têtes de file de ces familles sont l'atome d'uranium de nombre de masse 238, l'atome d'uranium de nombre de masse 235 et l'atome de thorium de nombre de masse 232.

La figure 5.3 représente la filiation de la première famille. La première transformation est la transformation de ^{238}U en ^{234}Th qui s'accompagne de l'éjection d'une particule α. Viennent ensuite

deux transmutations avec émission de rayons β qui transforment le thorium en protactinium et ce dernier en isotope d'uranium de nombre de masse 234. A la suite des cinq transformations α on aboutit à un isotope instable du plomb de nombre de masse 214. Encore deux autres suites de transformations et on arrive à la fin de la famille qui est un isotope stable de plomb 206.

La désintégration de chaque atome est un événement aléatoire; il existe des atomes qui ont la « veine » de survivre pendant longtemps et il en est d'autres qui ne vivent qu'une fraction de seconde.

En aucun cas on ne peut prévoir à quel moment un atome donné subira une transmutation, pas plus que nous ne pouvons prédire le jour où crévera notre chat. Mais comme il existe une durée de vie moyenne pour chaque espèce d'animal, il existe un temps de vie moyen pour chaque espèce d'atomes. On remarquera que le comportement des atomes est bien différent de celui des animaux en ce que la durée de vie moyenne des atomes est indépendante des conditions extérieures. Rien ne peut modifier le temps de désintégration moyen; par unité de temps se désintègre toujours la même partie du nombre d'atomes existants:

$$\frac{\Delta N}{N} = \lambda t.$$

Cette formule ne convient que lorsque le rapport $\Delta N/N$ est petit.

λ est une constante caractéristique de chaque transformation radioactive. On préfère caractériser tout processus de désintégration par sa période (demi-vie) qui est le temps nécessaire pour que la moitié d'une masse quelconque de l'élément radioactif se désintègre. Les périodes varient con-

sidérablement d'un élément radioactif à un autre. Par exemple la demi-vie de la tête de file de la famille de ^{238}U est de 4,5 milliards d'années. La demi-vie de l'isotope du plomb de nombre de masse 214 n'est que d'un millionième de seconde.

RÉACTIONS NUCLÉAIRES ET DÉCOUVERTE DU NEUTRON

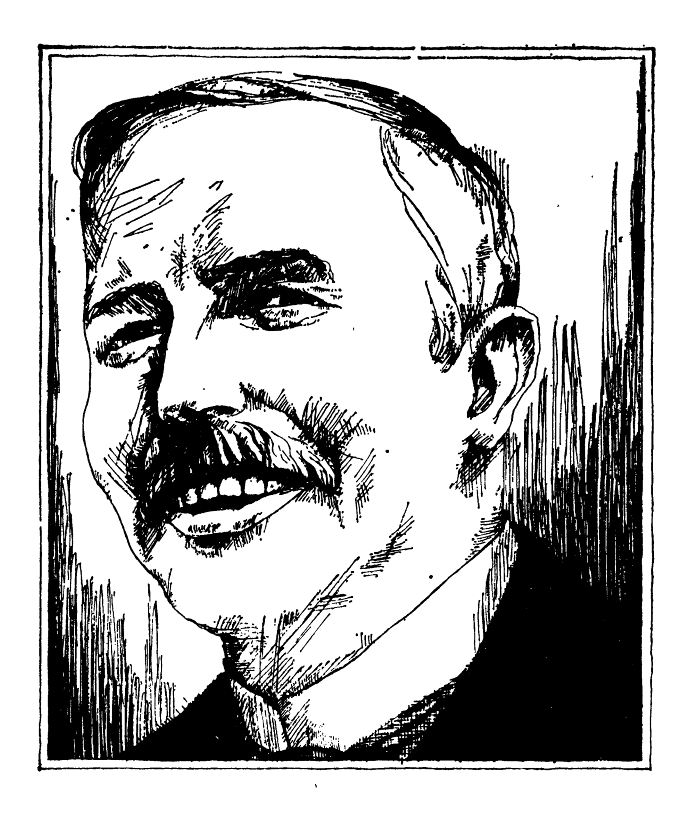
Les transformations radioactives sont parfaitement analogues aux réactions chimiques de décomposition ; une substance chimique se décompose sous l'action de la chaleur ou de la lumière en deux autres substances ; par exemple, l'acide carbonique se décompose en donnant de l'eau et du gaz carbonique. De même dans la désintégration considérée plus haut le noyau de thorium 230 éclate en donnant un noyau de radium et un noyau d'hélium.

Si les désintégrations nucléaires sont possibles, doivent être possibles les réactions nucléaires évoluant selon le schéma

$$A + B \to C + D.$$

Pour amorcer une réaction chimique il faut que se rencontrent les molécules des substances A et B. De même pour qu'une réaction nucléaire ait lieu il faut assurer le choc de deux noyaux atomiques.

La première expérience de ce genre a été réalisée en 1919 par Rutherford. Comme les accélérateurs de particules n'existaient pas encore, on réalisait les réactions nucléaires en soumettant la substance étudiée au bombardement par les particules α. Lorsqu'on apprit à produire des flux importants de protons et d'autres noyaux on réalisa de nouvelles réactions nucléaires et il devint évident qu'il était possible de transformer



ERNEST RUTHERFORD (1871-1937). Célèbre physicien anglais, expérimentateur de grand talent. Il imagina et réalisa des expériences subtiles pour élucider la nature des réactions de désintégration radioactive. Ses expériences, devenues classiques, sur la diffusion des flux de particules α par les substances, permirent de justifier la théorie moderne de la structure des atomes, que l'on conçoit comme des systèmes composés de noyaux et d'électrons qui gravitent tout autour. A l'aide d'expériences de bombardement des cibles par des noyaux, il réalisa la première transmutation des éléments.

un isotope de n'importe quel élément chimique en un autre isotope. On peut produire de l'or à partir d'autres substances, ce qui était le rêve des alchimistes.

La première réaction du type $A + B \rightarrow C + D$ a été la réaction de transmutation de l'azote et de l'hélium en oxygène et hydrogène. Cette réaction s'écrit comme suit:

$$^{14}_{7}N + ^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow ^{17}_{8}\mathrm{O} + ^{1}_{1}\mathrm{H}.$$

On notera que la somme des nombres placés en haut et la somme des nombres placés en bas se conservent. Les chiffres du bas indiquent la charge des noyaux et les chiffres du haut les nombres de masse. Ainsi la loi de la conservation de la charge électrique est rigoureusement satisfaite. On démontrera plus loin que la loi de la conservation de la masse n'est vérifiée qu'approximativement. La somme des nombres de masse se conserve aussi rigoureusement que la somme des charges électriques.

Dès 1920 Rutherford suggéra que devait exister une particule dénuée de charge électrique dont la masse serait peu différente de la masse du proton. Il avança cette hypothèse pour expliquer le pouvoir de pénétration des particules α, portant des charges positives, dans les noyaux portant des charges également positives (rappelons que les charges de même signe se repoussent).

La particule dénuée de charge électrique fut découverte en 1932 et fut baptisée neutron. On conçoit fort bien pourquoi il fallut attendre tout ce temps pour la découvrir. On décèle la présence des particules chargées par les traces qu'elles laissent dans les gaz ou dans les émulsions photosensibles grâce à leur aptitude à ioniser les molécules qu'elles trouvent sur leur chemin. Or, une particule électriquement neutre n'interagit pas

avec les électrons et, par conséquent, ne peut laisser des traces de son passage. L'existence des neutrons se révèle par des effets secondaires.

Le neutron fut découvert au cours d'expériences où on soumettait le béryllium au bombardement de particules α. Cette réaction s'écrit:

$$ {}^{9}_{4}\mathrm{Be} + {}^{4}_{2}\alpha \to {}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{1}_{0}n. $$

Le symbole n désigne le neutron. Mais comment peut-on avoir foi en l'existence d'une particule qui ne laisse aucune trace de son passage. La réponse à cette question est: par les effets qu'elle provoque. Imaginez une table de billard sur laquelle se trouve une bille invisible. Une bille de billard, bien visible, roule sur le tapis et tout-à-coup dévie de son chemin. Un physicien n'admettra jamais que les lois de conservation de l'énergie et de l'impulsion soient en défaut; il conclura donc que la bille visible a heurté une bille invisible. Appliquant les lois de la conservation il pourra déterminer toutes les caractéristiques de la bille invisible s'il connaît l'angle de déviation et la variation de vitesse de la bille visible.

On évalue le nombre de neutrons par le procédé suivant. On interpose une substance contenant du bore sur le trajet d'un jet de neutrons. Lorsqu'un neutron rencontre un atome de bore il disparaît conformément à la réaction

$$ {}^{10}_{5}\mathrm{B} + {}^{1}_{0}n \to {}^{7}_{3}\mathrm{Li} + {}^{4}_{2}\alpha. $$

A la place du neutron apparaît une particule α. Comme les particules α laissent des traces bien visibles dans différents milieux de détection on peut les dénombrer et déterminer l'intensité du jet de neutrons.

Il existe d'autres méthodes permettant de déterminer avec certitude tous les paramètres

caractérisant les neutrons ou n'importe quelle autre particule électriquement neutre. L'ensemble des données indirectes concourantes est bien souvent plus sûr que l'examen de traces visibles.

PROPRIÉTÉS DES NOYAUX ATOMIQUES

Avant que fut découvert le neutron les physiciens pensaient que le noyau atomique était composé d'électrons et de protons. Cette hypothèse était empreinte de contradictions et ne pouvait servir de base à l'élaboration d'une théorie de la structure du noyau. Dès qu'on décela l'apparition de neutrons lors des chocs nucléaires, on suggéra que le noyau atomique devait être construit avec des protons et des neutrons. Pour la première fois cette hypothèse fut avancée par le physicien soviétique D. D. Ivanenko.

Dès le début on était persuadé que la masse du neutron, même si elle ne serait pas rigoureusement égale à la masse du proton, n'en différerait que fort peu. Cela permit d'expliquer clairement la cause des différences existant entre les isotopes d'un même élément chimique.

On peut attribuer à chaque isotope deux nombres. L'un de ces nombres est le numéro atomique Z de l'élément chimique dans le tableau de Mendéléev; ce nombre est égal au nombre de protons contenus dans le noyau. Le numéro atomique détermine aussi le nombre d'électrons liés au noyau. Il s'ensuit que le numéro atomique caractérise le comportement chimique des éléments (puisque les réactions chimiques n'affectent pas les noyaux).

Quant au nombre de masse, il est égal au nombre total de neutrons et de protons. Il s'ensuit que les isotopes d'un même élément chimi-

que se distinguent par le nombre de neutrons contenus dans les noyaux.

Des études expérimentales de haute précision ont permis de déterminer les caractéristiques des deux particules formant les noyaux des atomes. La masse du proton est égale à $1{,}6726 \cdot 10^{-24}$ g, i.e. elle est 1836 fois plus grande que la masse de l'électron. Le proton a un spin 1/2 et un moment magnétique égal à $1{,}41 \cdot 10^{-23}$ un. CGS. Le neutron a une masse légèrement supérieure à celle du proton, $1{,}6749 \cdot 10^{-24}$ g. Le neutron a un spin 1/2 et un moment magnétique de $0{,}966 \cdot 10^{-23}$ un. CGS qui est antiparallèle au spin.

On détermine les spins et les moments magnétiques des noyaux atomiques en mettant en œuvre différentes méthodes: spectroscopie optique, radiospectroscopie, déviation des jets de particules par un champ magnétique non uniforme. Les principes généraux de ces méthodes ont été exposés dans le livre 3 et dans les chapitres qui précèdent. On n'exposera donc que quelques résultats importants obtenus au cours des dernières décennies.

On notera tout d'abord que les lois de la physique quantique relatives au moment cinétique s'appliquent à toutes les particules. Par conséquent le moment cinétique du noyau atomique est donné par la formule

$$\sqrt{S(S+1)}\,\frac{h}{2\pi},$$

où h est la constante de Planck que l'on trouve dans toutes les formules de la physique quantique.

Généralement on désigne par spin d'une particule le paramètre S et non pas l'expression ci-dessus. On démontre en théorie et l'expérience le confirme que le spin de n'importe quelle particule ne peut être égal qu'à 0, 1/2, 1, 3/2, etc.

Un examen du tableau des valeurs du spin des différents noyaux atomiques (obtenues dans des expériences différentes) révèle plusieurs faits intéressants. Les noyaux qui contiennent un nombre pair de protons et un nombre pair de neutrons ont un spin nul (^{4}He, ^{12}C, ^{16}O). Il apparaît qu'un nombre de nucléons (i.e. de particules nucléaires) multiple de quatre joue en général un rôle important. Dans de nombreux cas (mais pas dans tous les cas) on peut déterminer le spin des noyaux atomiques de la façon suivante : on retranche du nombre de masse A un nombre entier multiple de quatre le plus voisin de A, et on multiplie par 1/2 la différence obtenue. Par exemple, le spin du lithium-6 est égal à $2 \times 1/2 = 1$; pour le lithium-7 on trouve un spin 3/2 ; pour le bore-10 le spin vaut 1 et 3/2 pour le bore-11.

Une règle aussi simple qu'évidente s'énonce comme suit : les noyaux dont le nombre de masse A est pair ont des spins nuls ou entiers et les noyaux dont le nombre de masse A est impair ont des spins qui sont des multiples de 1/2.

Le principe de Pauli s'applique aux protons et aux neutrons contenus dans le noyau. Deux particules identiques ne peuvent occuper simultanément un même niveau d'énergie que si leurs spins sont antiparallèles. Comme le proton et le neutron sont deux particules différentes un niveau d'énergie peut être occupé par deux neutrons et deux protons. Ce groupement compact de spin nul est le noyau d'hélium (particule α).

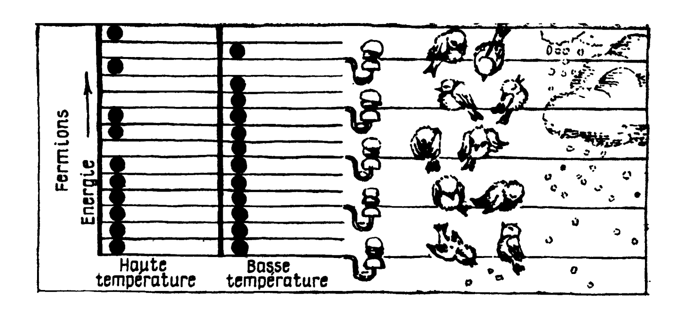
L'existence d'un spin implique l'existence d'un moment magnétique. On sait que le moment mécanique L est proportionnel au moment magnétique M, le moment magnétique pouvant être parallèle ou antiparallèle au spin.

Nous avons déjà signalé plusieurs fois qu'un même niveau énergétique ne peut être occupé que par deux particules à spins antiparallèles. Il convient de préciser maintenant que ce principe (principe de Pauli) n'est valable que pour une seule classe de particules, appelées fermions. A cette classe appartiennent les électrons, les protons et les neutrons. Signalons aussi que tout système lié composé d'un nombre impair de fermions est un fermion. La deuxième classe de particules est celle des bosons. A cette classe appartiennent les photons, certaines particules élémentaires ayant une durée de vie très courte (par exemple, les pions) et surtout toutes les particules composées d'un nombre pair de fermions.

Rien ne limite le nombre de bosons occupant un seul et même niveau d'énergie. La figure 5.4 illustre la différence entre les fermions et les bosons. Sur cette figure chaque cercle représente une paire de particules de spins opposés. A très basse température les bosons s'accumulent surtout sur le niveau le plus bas, tandis que les fermions sont disposés les uns au-dessus des autres.

Il tombe sous le sens que les différences de comportement des fermions et des bosons doivent se manifester le plus nettement aux très basses températures; aux très basses températures le nombre de bosons se tenant à l'étage inférieur peut presque égaler leur nombre total.

Ces assertions n'ont pas à être interprétées, il suffit de les avoir présentes à la mémoire. C'est une vérité absolue, mais l'auteur se sent gêné chaque fois qu'il doit présenter au lecteur des résultats qui ne peuvent être démontrés qu'à l'aide d'un appareil mathématique compliqué.



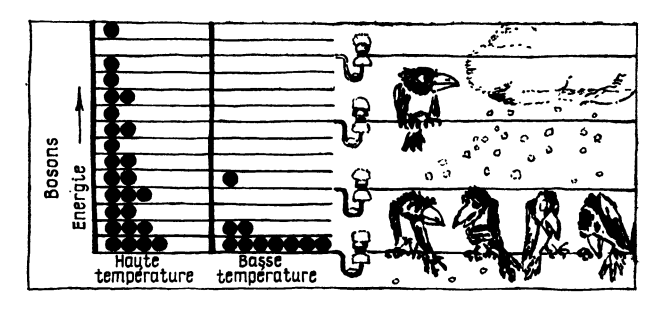


Fig. 5.4

Il s'avère ainsi que dans certains cas les bosons peuvent s'accumuler en grandes quantités sur un même niveau et dans certains autres ils ne peuvent le faire. Lorsqu'ils peuvent le faire on dit qu'on a affaire à une condensation de Bose-Einstein.

Lorsqu'un grand nombre de particules occupe un même niveau, leurs mouvements sont parfaitement corrélés. Ces particules se déplacent de façon parfaitement identique malgré l'agitation thermique, qui cherche à créer le chaos.

Dans le livre 2 il a été question d'un liquide extraordinaire, qui devenait superfluide à très

basse température. Ce liquide est un ensemble d'atomes ^{4}He. Les atomes de cet isotope sont des bosons. A la température de 2,19 K les particules subissent une condensation et le liquide devient superfluide. La disparition du frottement s'interprète *grosso modo* de la façon suivante : si un des atomes arrive à s'infiltrer dans une fente étroite, tous les atomes le suivront.

Nous avons fait connaissance avec deux phénomènes où un flux de particules se meut malgré tous les obstacles. Le mouvement superfluide des atomes ^{4}He rappelle le passage d'un courant électrique dans un conducteur dénué de résistance électrique qui s'observe aux basses températures dans de nombreux métaux et alliages.

Mais les électrons sont des fermions et ils ne peuvent donc se rassembler comme des bosons. Pour expliquer le phénomène d'une résistance nulle, les physiciens américains ont élaboré en 1956 une théorie selon laquelle, au-dessous d'une certaine température, les électrons s'associent en paires. Nous avons indiqué plus haut qu'une paire de fermions se comporte comme un boson. Il s'ensuit que la supraconductibilité se manifeste lorsque ces bosons se condensent sur un même niveau d'énergie. Les phénomènes de superfluidité et de supraconductibilité s'interprètent de la même façon : lorsqu'une particule s'engage sur un chemin plus facile que tous les autres, toutes les autres particules la suivent.

Si l'hypothèse de la transformation des fermions en bosons par formation de paires est juste, on peut se demander si l'isotope ^{3}He qui possédant un spin non nul est un fermion, ne pourrait devenir superfluide comme ^{4}He l'est.

Il était clair dès le début que si ce phénomène pouvait exister, il ne se manifesterait qu'à des températures beaucoup plus basses que la tempé-

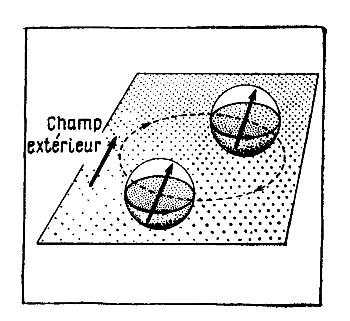


Fig. 5.5

rature de transition à l'état superfluide de ^{4}He. La cause en est évidente: le noyau de ^{3}He se compose de deux protons et d'un neutron. Il est donc de 25 % plus léger que ^{4}He. Pour cette raison les mouvements thermiques de ^{3}He doivent être plus intenses et une marche ordonnée des bosons ne sera possible qu'à plus basse température. La théorie ne pouvait indiquer la température de transition à l'état superfluide pour ^{3}He. Il fallait fournir un travail opiniâtre et surmonter d'énormes difficultés pour obtenir en 1974 de l'hélium 3 superfluide.

Quelle est la température de cette transition? La réponse devrait être imprimée en lettres capitales: à la température de 0,0027 K. Il se peut que le lecteur pense: « Peuh! Deux degrés seulement au-dessous de la température de transition de ^{4}He ». Eh bien, pour arriver à abaisser la température de 20 à 18 °C il a fallu l'abaisser de 293/291 fois tandis que dans le cas dont il est question on l'a abaissée de 1000 fois. Ça a été un gros succès de la physique expérimentale et un triomphe de la théorie qui a prévu que les paires de ^{3}He se comporteraient en bosons.

Une image aide toujours à garder un fait intéressant dans la mémoire, et c'est pour cela qu'on donne sur la figure 5.5 un schéma d'une

paire. Les moments magnétiques des deux atomes sont parallèles puisque cette paire d'atomes se comporte comme un tout. La transition de ^{3}He à l'état de condensation de Bose-Einstein doit donc donner lieu à un saut de la fréquence de résonance magnétique. C'est ce que l'on observa. Ce sont là des faits qui font honneur à la Physique et on ne pouvait ne pas en parler, quoiqu'il soit impossible d'expliquer ici dans quelles conditions et pour quelles raisons les fermions s'associent en paires bosoniques.

MASSE ET ÉNERGIE DU NOYAU ATOMIQUE

On a mentionné plus haut que le nombre de masse est le nombre entier voisin de la masse du noyau.

Actuellement on prend pour unité de masse atomique (nous en avons déjà parlé dans le livre 1) la 1/12 partie de la masse de l'isotope du carbone ^{12}C.

Les masses relatives des isotopes de tous les atomes diffèrent des nombres de masse d'une quantité très petite mais qui ne peut être attribuée aux erreurs expérimentales. La masse de ^{1}He est égale à 1,00807, mais la masse du deutérium égale à 2,01463 n'est pas le double de la masse de ^{1}He.

Un examen attentif du tableau des masses des isotopes permet d'arriver à une conclusion importante : la masse du noyau est plus petite que la somme des masses de toutes les particules élémentaires qui le composent. Par exemple, la masse du neutron est 1,00888 et celle du proton est 1,008807 ; la masse de deux neutrons et de deux protons est égale à 4,0339 (en unités de masse atomiques, 1 u.m.a. = $1{,}66\cdot10^{-27}$ kg). Or, la masse du noyau de l'atome d'hélium qui se

compose de deux neutrons et de deux protons est égale à 4,0038. Ainsi la masse du noyau d'hélium est plus petite que la somme des masses des particules qui le constituent de 0,0301 u.m.a. ; cette différence est plusieurs milliers de fois plus grande que la précision des mesures.

Il est certain que ces petits écarts ont une signification importante, mais laquelle ?

C'est la théorie de la relativité qui répondit à cette question et son apparition sur la scène à ce moment a été plus spectaculaire que le jour où l'expérience confirma la dépendance de la masse de l'électron avec sa vitesse. Le fait que la masse du noyau est plus petite que la somme des masses des protons et des neutrons composant le noyau et désigné sous le nom de défaut de masse, trouve une interprétation simple et exacte à l'aide de la formule $E = mc^2$. La diminution de la masse est due à l'interaction des protons et des neutrons : les particules en interaction semblent tomber dans un puits de potentiel plus profond. Lorsqu'un système reçoit ou fournit une quantité d'énergie ΔE, la masse de ce système augmente ou diminue d'une quantité

$$\Delta m = \Delta E/c^2.$$

Au point de vue de ce principe, le défaut de masse du noyau s'explique tout naturellement : il représente une mesure de l'énergie de liaison des nucléons.

En chimie et en physique on entend par énergie de liaison le travail qu'il fait fournir au système pour briser les liaisons chimiques. Si on arrivait à diviser le noyau en plusieurs parties, la masse du système se serait accrue d'une quantité égale au défaut de masse Δm.

La fission du noyau libérerait une énorme quantité d'énergie. On trouve facilement qu'une

variation de masse d'un millième d'une unité de masse atomique, i.e. de $1{,}66 \cdot 10^{-27}$ g, équivaut à 1 MeV environ.

Connaissant la masse atomique du noyau, le lecteur pourrait découvrir le fait suivant. Si on divise l'énergie de liaison des protons et des neutrons dans le noyau par le nombre de ces particules élémentaires on obtient un même nombre pour tous les noyaux — 8 MeV (exception faite des noyaux les plus légers). On en tire une conclusion importante : seuls les neutrons et protons voisins entrent en interactions mutuelles, ce qui signifie que les forces nucléaires agissent à courte distance. Ces forces deviennent pratiquement nulles dès qu'on s'éloigne du proton ou du neutron d'une distance comparable à leur dimension (i.e. de 10^{-13} cm).

Il est instructif de comparer la quantité d'énergie 8 MeV aux valeurs des énergies de liaison chimique dans les molécules. Ces dernières sont généralement égales à quelques électrons-volts par atome. Il s'ensuit que pour décomposer une molécule en atomes on doit dépenser une énergie plusieurs millions de fois plus petite que pour réaliser la fission d'un noyau atomique.

Ces quelques exemples montrent que les forces nucléaires sont extrêmement importantes, et qu'il s'agit ici d'une nouvelle catégorie de forces, puisqu'elles assurent la liaison de particules portant des charges électriques de même signe. On ne peut donc ramener les forces nucléaires aux forces électriques.

Les lois qui régissent ces deux types de forces sont très différentes. Les forces électromagnétiques décroissent lentement et les instruments de mesure peuvent noter l'existence des champs électromagnétiques à très grande distance des particules chargées. Les forces nucléaires décrois-

sent très vite avec la distance et hors les frontières du noyau elles sont pratiquement inexistantes.

Une autre différence est que les forces nucléaires (à la façon des forces chimiques de valence) sont saturables. Chaque nucléon, i.e. chaque proton ou neutron, n'interagit qu'avec un nombre limité de leurs plus proches voisins. Une telle limitation n'existe pas pour les forces électromagnétiques.

Il existerait donc trois sortes de forces : de gravitation, électromagnétiques et nucléaires ? On ne peut donner une réponse nette à cette question. Les physiciens connaissent encore une quatrième sorte de forces qui ont été dénommées (malencontreusement) d'« interaction faible ». On n'en dira rien ici, d'autant plus qu'on n'a pas perdu l'espoir de les ramener aux forces électromagnétiques.

ÉNERGIE DES RÉACTIONS NUCLÉAIRES

Nous avons établi deux faits importants. Premièrement, les noyaux atomiques peuvent réagir entre eux selon des équations rappelant les équations des réactions chimiques, et deuxièmement, les masses des noyaux initiaux diffèrent un peu des masses des particules qui se sont formées (il y a conservation de la somme des nombres de masse et non pas de la somme des masses des noyaux avant et après réaction).

En outre, nous avons constaté qu'aux très petites différences de masse correspondent d'énormes quantités d'énergie libérées ou absorbées.

Les énergies libérées ou absorbées dans les transmutations nucléaires sont incomparablement plus grandes que celles qui accompagnent les réactions chimiques. Pour en donner une idée, considérons les exemples suivants. La com-

bustion d'un gramme de charbon dégage une quantité de chaleur juste suffisante pour porter à l'ébullition un demi-verre d'eau. Si on arrivait à désintégrer tous les atomes contenus dans un gramme de béryllium en les bombardant avec des particules α, ce processus dégagerait une quantité de chaleur suffisante pour porter à l'ébullition mille tonnes d'eau.

Rutherford et ses collaborateurs connaissaient bien ces estimations et néanmoins Rutherford estimait que l'utilisation des réactions nucléaires à des fins pratiques était irréalisable (aucun physicien ne pouvait imaginer l'éventualité des réactions nucléaires en chaîne). Notons que Rutherford se comporta comme Faraday et Hertz, puisqu'aucun d'eux ne pouvait prévoir la révolution technique que provoquera sa découverte. Mais comme nous savons aujourd'hui ce qui s'ensuivit des expériences de Rutherford, il convient de rappeler au lecteur le principe du mécanisme déterminant la libération ou l'absorption d'énergie dans les réactions.

Il est instructif de noter tout d'abord les similitudes entre les réactions chimiques et les réactions nucléaires.

Dans les réactions où, à partir des particules *A* et *B* on obtient des particules *C* et *D*, de la chaleur sera libérée ou absorbée suivant qu'il se forme des particules rapides à partir des particules lentes ou des particules lentes à partir des particules rapides. Cela concerne aussi bien les réactions chimiques que les réactions nucléaires. D'autre part, lorsque des particules rapides se forment à partir de particules lentes, cela signifie que l'énergie cinétique du système s'est accrue. Or, la loi de la conservation de l'énergie exige alors que l'énergie potentielle du système diminue. Dans le cas considéré la somme des énergies

internes des particules A et B est plus grande que la somme des énergies internes des particules C et D. C'est ainsi que cela se passe dans le cas des réactions chimiques et aussi dans celui des réactions nucléaires.

Selon la loi d'Einstein toute diminution de l'énergie interne est liée de façon univoque à une diminution de la masse, et toute augmentation de l'énergie interne entraîne une augmentation de la masse. Cela s'applique aussi bien aux réactions chimiques qu'aux réactions nucléaires.

En chimie la loi de la conservation de la masse est vérifiée : la somme des masses des molécules A et B est égale à la somme des masses des molécules C et D. Dans les réactions nucléaires cette égalité n'est plus vérifiée. Peut-on en conclure qu'il existe une différence essentielle entre ces deux classes de réactions? Nullement, la différence n'est que quantitative. Dans les transformations chimiques les variations d'énergie et donc, celles de la masse, sont tellement négligeables (négligeables au point de vue de la théorie relativiste) qu'on n'arrive pas à déceler expérimentalement les variations des masses des molécules. L'analogie entre les deux classes de réactions est donc complète.

Comme ce résultat est important (on s'imagine bien souvent, à tort bien entendu, que la libération de l'énergie nucléaire est un phénomène très particulier) nous allons considérer le cas où la particule A se décompose en donnant les particules B et C. Si la particule A se décompose spontanément on dit qu'elle est instable. Si A est une molécule, on dira que la substance correspondante se décompose, et si A est un noyau la substance est dite radioactive. Dans les deux cas la transformation s'accompagne d'une libération de chaleur et les particules B et C posséderont une

énergie cinétique qui n'« existait » pas avant. Cette énergie provient de l'énergie potentielle du système. Pour faire image on dira que le ressort qui tenait ensemble les particules *B* et *C* a cassé, ce qui signifie que l'énergie de liaison a disparu. C'est aux dépens de cette énergie qu'on a obtenu des particules *B* et *C* animées de vitesses accrues, ce qui signifie que de l'énergie a été libérée sous forme de chaleur.

Dans le cas des réactions chimiques on ne peut déceler une différence entre la masse de la molécule *A* et la somme des masses des molécules *B* et *C*, l'énergie mise en jeu étant trop petite. Dans le cas des réactions nucléaires on détermine aisément ces différences de masse ; les masses des noyaux *B* et *C* diffèrent de la masse du noyau *A* d'une quantité qui a été appelée défaut de masse.

Le fait qu'une réaction dégage de la chaleur ne signifie nullement qu'elle peut avoir des applications pratiques. Le fait que le système se trouve dans un état instable et que la substance initiale se trouve sur un niveau d'énergie plus élevé que ceux qu'occupent les produits de réaction constitue, en langage mathématique, une condition nécessaire mais non suffisante.

Nous avons exposé en détail dans le livre 2 les conditions auxquelles doit satisfaire une substance pour pouvoir être utilisée comme combustible chimique. Il nous reste à poursuivre l'étude des analogies entre les réactions chimiques et nucléaires.

Rappelons qu'il ne suffit pas qu'une réaction chimique dégage de la chaleur, il faut encore que cette chaleur « enflamme » les molécules voisines.

Il s'ensuit que lorsque les physiciens apprirent à réaliser des transmutations à l'aide de chocs entre les noyaux atomiques avec libéra-

tion d'énormes quantités d'énergie, ils n'ont encore rien fait pour créer le combustible nucléaire.

Dans les transmutations déterminées par le bombardement avec des particules α ni le béryllium, ni le lithium ne se comportent nullement comme des combustibles nucléaires. Ils ne satisfont qu'à la première condition de tout combustible — ils dégagent de l'énergie. Le lithium et le béryllium se comportent comme de petits morceaux de charbon qui devraient être enflammés, séparément, l'un après l'autre, à l'aide d'allumettes.

Jusqu'à la fin des années trente on estimait qu'il serait impossible de trouver un combustible nucléaire.

RÉACTIONS NUCLÉAIRES EN CHAÎNE

Les recherches entreprises depuis 1934, surtout par Enrico Fermi (1901-1954) et son équipe, montrèrent que les noyaux des atomes de la plupart des éléments chimiques peuvent absorber des neutrons lents et devenir radioactifs.

A cette époque on connaissait les transmutations radioactives avec émission d'électrons et de particules α (ces transmutations s'accompagnent d'une émission des rayons γ). En 1938 plusieurs chercheurs constatèrent que l'uranium activé par des neutrons selon la méthode créée par Fermi, contenait un élément chimique ressemblant au lanthane (on notera que cette découverte fondamentale ne peut être attribuée nommément à un seul savant). Ce résultat ne pouvait être interprété que d'une seule façon : bombardés de neutrons les atomes d'uranium se rompent en donnant deux fragments approximativement égaux. L'importance exceptionnelle de cette dé-

couverte fut aussitôt comprise. En effet, on savait déjà que plus le numéro atomique d'un élément est grand, plus son noyau renferme de neutrons. Dans le noyau d'uranium le rapport du nombre de neutrons au nombre de protons est égal à 1,6 environ. Dans les noyaux d'éléments chimiques situés au milieu du tableau périodique, le lanthane par exemple, ce rapport est compris entre 1,2 et 1,4.

Or, si un noyau d'uranium se scinde en deux parties approximativement égales, les noyaux de ces produits de fission renfermeront immanquablement un excès de neutrons et éjecteront ceux-ci ; ce sont justement les neutrons qui jouent le rôle d'« allumettes ».

Le principe d'une réaction en chaîne est maintenant perceptible. Le premier calcul de ce phénomène fut effectué en 1939. Des dizaines d'ouvrages exposèrent l'évolution des événements dramatiques qui suivirent — construction de la première pile (ou réacteur) atomique, création des premières bombes atomiques et bombardement de Hiroshima. Nous n'en parlerons pas par manque de place mais nous exposerons l'état actuel de cette question.

Il faut expliquer d'abord ce qu'est une réaction nucléaire en chaîne, puis comment faire pour la contrôler et expliquer enfin, dans quelles conditions ces réactions conduisent à des explosions.

La figure 5.6 représente un schéma de l'une des plus importantes réactions en chaîne — la fission des noyaux d'uranium-235.

Un premier neutron se trouvera toujours dans l'atmosphère, mais si on veut avoir un « allumage » plus efficace on peut utiliser une très petite quantité d'un mélange de radium et de béryllium.

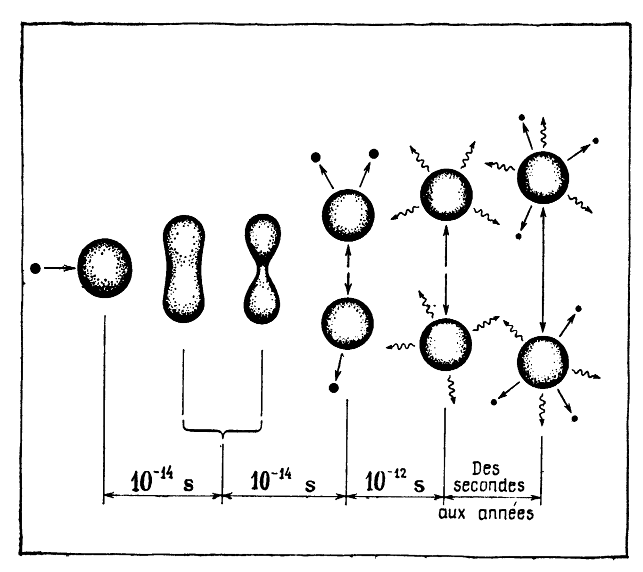


Fig. 5.6

Le noyau d'uranium-235 se compose de 92 protons et de 143 neutrons empilés de façon dense dans une sphère de 10^{-12} cm de rayon. Lorsqu'un neutron tombe sur un de ces noyaux il en est absorbé et le transforme en isotope 236. Ce neutron supplémentaire déforme le noyau; après un laps de temps de 10^{-14} s les deux moitiés du noyau ne sont plus unis que par un « fil » tenu ; au bout de 10^{-14} s ce « fil » casse et le noyau se trouve divisé en deux parties. Simultanément ces deux fragments de noyau éjectent deux ou trois neutrons chacun (2,56 en moyenne). Les fragments possèdent une énorme énergie cinétique. Un gramme d'uranium-235 produit autant d'énergie que 2,5 tonnes de charbon, soit 22 000 kWh. Au bout de 10^{-12} s les noyaux nou-

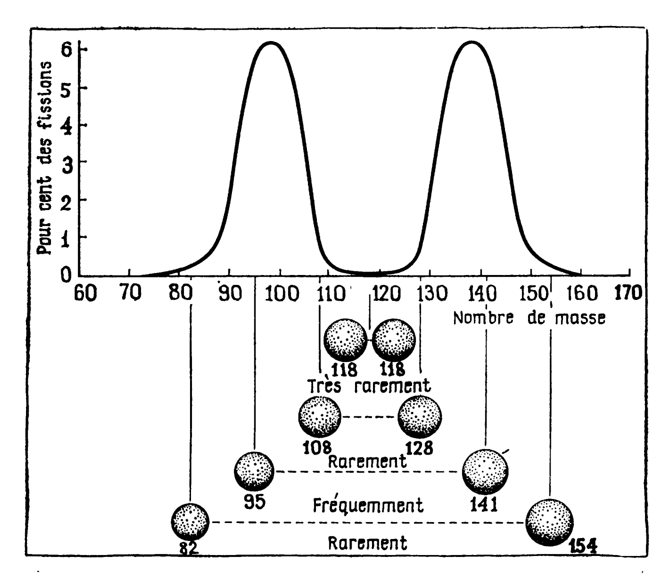


Fig. 5.7

vellement formés perdent de la vitesse après avoir émis huit photons gamma ; ces noyaux sont radioactifs. Suivant la nature des fragments, leur désintégration ultérieure peut durer de quelques secondes à plusieurs années et s'accompagne de l'émission de rayons gamma et de l'éjection d'électrons.

La figure 5.7 montre que le plus souvent un noyau d'uranium-235 se scinde en deux fragments inégaux. La courbe montre que la majorité des fissions conduit à la formation de noyaux de nombres de masse 141 et 95.

La collection des fragments radioactifs est en général très variée et les besoins industriels en éléments radioactifs artificiels peuvent être largement satisfaits.

Si les neutrons formés par fission d'un noyau seront capables de diviser les noyaux des autres atomes d'uranium, la réaction en chaîne est réalisable.

Etant donné que la fraction d'espace occupée par les noyaux dans toutes les substances est très petite la probabilité de perte des neutrons formés par fission d'un noyau est grande. D'autre part, tous les chocs des neutrons avec des noyaux ne provoquent pas nécessairement des fissions. Une réaction en chaîne ne se développe que si, à chaque instant ultérieur, le nombre de neutrons contenus dans la masse de la substance est égal ou supérieur à celui qui s'y trouvait à l'instant précédent. Les physiciens formulent cette condition de la façon suivante : le coefficient de multiplication des neutrons, défini comme le produit du nombre de neutrons par la probabilité de leur rencontre avec les noyaux et par la probabilité de leur capture ne doit pas être inférieur à l'unité.

C'est pour cela que tout combustible nucléaire pur est caractérisé par une masse critique. Si la masse de combustible est plus petite que la masse critique on peut porter ce morceau dans sa poche, sans trop se faire de souci, et sans trop de peine, car la masse critique est égale à un kilogramme environ.

On conçoit aisément à quel point la connaissance de la masse critique est importante. Le premier calcul de la masse critique fut effectué en 1939 par F. Perrin. Ce calcul ne présente qu'un intérêt historique car on ne savait pas encore en ce temps-là que la réaction en chaîne était irréalisable dans l'uranium naturel, quelle que fut la masse de l'échantillon. Mais peu de temps après on comprit que la réaction en chaîne ne se développait pas dans l'uranium naturel parce que les neutrons provenant de la fission des noyaux de

l'uranium-235 étaient absorbés par les noyaux d'uranium-238 en donnant de l'uranium-239; à la suite de deux désintégrations bêta successives l'uranium-239 se transforme d'abord en neptunium puis en plutonium. Seuls l'uranium-235 et le plutonium possèdent des masses critiques et sont donc des combustibles nucléaires. Ce sont les données dont disposaient les physiciens au début des années quarante.

Si on élaborait un mécanisme qui permettrait, sur commande, de réunir deux morceaux de combustible nucléaire, ayant séparément des masses inférieures à la masse critique, mais qui ensemble auraient une masse plus grande que la masse critique, on pourrait produire une explosion. C'est le principe de la bombe atomique.

Et que faudrait-il faire pour contrôler l'évolution d'une réaction en chaîne? La réponse est évidente: il faut créer un système contenant en plus des atomes de combustible d'autres atomes qui absorberaient les neutrons et les mettraient hors circuit. On utilise pour cela des barres de cadmium (le cadmium absorbe avidement les neutrons). On réalise une construction composée de barres de combustible nucléaire et de barres de cadmium que l'on peut déplacer dans la partie active (ou cœur) du réacteur (ou chaudière nucléaire). En réglant à l'aide des barres de cadmium le coefficient de multiplication des neutrons afin qu'il devienne à peine supérieur à l'unité on initie la réaction en chaîne ; lorsque le dégagement de chaleur aura atteint le niveau prévu on enfonce les barres de cadmium jusqu'à ce que le coefficient de multiplication devienne exactement égal à l'unité.

CHAPITRE 6

L'ÉNERGIE TOUT AUTOUR DE NOUS

SOURCES D'ÉNERGIE

En dernière instance toute l'énergie disponible provient du Soleil. Dans ses profondeurs, à des températures de plusieurs millions de degrés évoluent des réactions entre des noyaux atomiques. Ce sont des réactions thermonucléaires de fusion non contrôlées.

L'humanité a appris à provoquer sur Terre des réactions de ce type qui s'accompagnent de la libération d'une énorme quantité d'énergie. C'est la bombe à hydrogène. Des recherches sont en cours pour maîtriser l'évolution des réactions de fusion ; il en sera question plus loin.

Ces propositions servent à rendre naturelle la transition de l'étude de la structure des noyaux atomiques à celle des sources d'énergie disponibles sur Terre.

Dans les conditions terrestres on peut produire de l'énergie par trois groupes de procédés. Le premier groupe de procédés consiste à extraire l'énergie à partir d'un combustible chimique ou nucléaire. Pour cela il faut réaliser une réaction en chaîne au cours de laquelle des molécules ou des noyaux atomiques soient décomposés ou fusionnés. Les combustibles chimiques d'importance industrielle sont les combustibles fossiles: la houille, le pétrole et le gaz naturel. Les combustibles nucléaires sont l'uranium et le thorium (réactions de fission) ou bien des éléments légers, en premier lieu l'hydrogène (réactions de fusion).

Le deuxième groupe de procédés consiste à transformer l'énergie cinétique en travail, par exemple, travail produit par les chutes d'eau. L'énergie hydraulique — la « houille blanche » devient une importante source d'énergie lorsqu'on provoque la chute d'eau sur une grande hauteur— barrages ou chutes d'eau naturelles comme le Niagara. La transformation d'énergie mécanique en travail est réalisée aussi dans les éoliennes. Nous montrerons plus loin qu'il convient de prendre très sérieux la « houille bleue », i.e. les courants atmosphériques. Les éoliennes modernes peuvent apporter une contribution non négligeable au bilan énergétique du monde. A ce même groupe appartiennent les usines marémotrices utilisant l'énergie des marées.

Les lois de la thermodynamique suggèrent une troisième solution du problème énergétique. En principe on peut construire un moteur mu par une différence de température. On sait qu'une partie du flux de chaleur passant d'un corps chaud à un corps froid peut être transformée en travail mécanique. Or, on trouve des différences de température naturelles aussi bien dans l'écorce terrestre que dans l'océan mondial ou dans l'atmosphère. En s'enfonçant dans les profondeurs de la Terre on constate que, quel que soit le point de forage choisi, la température s'élève.

Ces trois groupes de potentialités énergétiques existent, rappelons-le une fois de plus, grâce au rayonnement solaire. La Terre ne capte qu'une infime partie de l'énergie apportée par les rayons solaires, mais cette partie infime représente une quantité d'énergie colossale, amplement suffisante pour satisfaire à tous les besoins de l'Humanité et pour réaliser ses projets les plus fantastiques.

On peut utiliser l'énergie solaire directement, en la transformant en courant électrique à l'aide de convertisseurs photovoltaïques (ou photopiles). Or, la forme la plus pratique d'utilisation de l'énergie est l'énergie électrique.

Il est évident que dans de nombreux cas on peut utiliser directement l'énergie interne des substances, ou l'énergie des flux d'eau ou d'air, sans passer par le stade de leur transformation en énergie électrique. Mais dans tous les cas hormis celui de la propulsion des avions et des fusées, il est rationnel d'extraire l'énergie électrique des sources primaires dans des centrales électriques et de l'utiliser ensuite à des fins pratiques. L'importance de l'énergie électrique deviendra encore plus grande lorsqu'on disposera d'accumulateurs légers, de petit encombrement et de grande capacité qui remplaceraient les accumulateurs que l'on trouve aujourd'hui dans les voitures automobiles, qui sont lourds et de faible capacité.

Avant de commencer la description des différentes sources d'énergie on voudrait attirer l'attention du lecteur sur l'existence de deux classifications importantes des sources d'énergie. Il existe une démarcation nette entre les combustibles et l'énergie du Soleil, entre la houille blanche et la houille bleue. Dans le premier cas on consomme sans espoir de récupération les ressources terrestres. Le Soleil, l'eau et l'air sont des sources d'énergie gratuites en ce sens que l'utilisation de l'énergie de ces sources n'entraîne aucune baisse des ressources terrestres. Le fonctionnement des éoliennes ne diminue pas la quantité d'air atmosphérique, celui des centrales hydroélectriques n'affecte pas la profondeur des rivières, et de même le fonctionnement des machines solaires ne consomme aucune substance terrestre.

Il existe un autre problème encore. C'est le

problème de l'environnement, de la flore et de la faune, dont l'importance ne doit jamais être sous-estimée. La combustion des combustibles non seulement réduit les ressources terrestres, mais pollue le sol, l'eau et l'air, créant une énorme masse de déchets. Avec les centrales hydroélectriques, la situation n'est pas bien satisfaisante de ce point de vue. Toute variation du régime normal des cours d'eau affecte le climat et entraîne la perte d'une proportion notable de la population de poissons.

Il est indubitable que le procédé optimal de production d'énergie serait l'utilisation directe du rayonnement solaire.

Après ces quelques remarques générales passons à un examen plus détaillé des potentialités d'utilisation de l'énergie dans les conditions terrestres ; le lecteur sera certainement intéressé par certains chiffres qui sont donnés dans les annuaires d'énergétique.

Commençons par donner une caractéristique de l'énergie solaire. Le Soleil envoie sur chaque mètre carré de la surface terrestre environ 1,4 kW (par an cela fait une énergie d'environ 10^{10} J). Pour produire une telle quantité de chaleur il faut brûler plusieurs centaines de kilogrammes de charbon. Evaluons la quantité totale de chaleur que la Terre reçoit du Soleil. Après avoir estimé l'aire de la surface terrestre et tenu compte de son éclairement irrégulier on trouve $\sim 10^{14}$ kW. Cette quantité d'énergie est 100 mille fois plus grande que l'énergie que reçoivent de toutes les sources d'énergie fonctionnant sur Terre les fabriques, les usines, les centrales électriques, les moteurs à combustion interne, etc., donc 100 mille fois plus grande que toute la puissance d'énergie consommée par toute la population de la Terre (près d'un milliard de kilowatts).

Aujourd'hui encore on n'utilise qu'une partie infime de l'énergie solaire. La raison de cette situation se résume dans le raisonnement suivant: l'évaluation de la quantité d'énergie solaire tombant sur la Terre est juste, mais toute cette énergie se répartit partout, sur les versants de montagne inaccessibles, sur les océans et sur les sables des déserts. D'ailleurs, la quantité d'énergie tombant sur une petite superficie n'est pas bien grande et il n'est pas du tout certain qu'il soit raisonnable d'installer des récepteurs d'énergie s'étendant sur des superficies se chiffrant par kilomètres carrés. Enfin, ce n'est que dans les régions où le nombre de journées ensoleillées est grand qu'il est rationnel de transformer l'énergie solaire en chaleur.

Les énormes besoins en énergie et le progrès dans la fabrication des photocellules à semiconducteurs ont profondément modifié l'approche des énergéticiens. Il existe actuellement beaucoup de projets et d'installations expérimentales servant à concentrer les rayons solaires sur des milliers de cellules photovoltaïques (à l'avenir il sera question de millions et de milliards de cellules photovoltaïques). Les techniciens ne craignent ni le ciel couvert par des nuages ni l'absorption des rayons solaires par l'atmosphère. L'utilisation directe de l'énergie solaire a d'excellentes perspectives dans un proche avenir.

L'approche de l'utilisation de l'énergie des courants atmosphériques s'est modifiée profondément elle aussi. Il y a vingt ans seulement on disait volontiers qu'il ne fallait pas espérer que le vent devienne une source d'énergie importante. Cette source d'énergie a les mêmes défauts que l'énergie solaire: la quantité d'énergie qu'on peut recueillir par unité de surface est relativement petite; pour une installation d'échelle

industrielle les pales des turbines à air devraient avoir une superficie irréalisable ; un autre défaut majeur est que la force du vent n'est pas constante. C'est pour cela que l'énergie du vent ne peut être utilisée qu'à l'aide de petites éoliennes qui par temps de vent peuvent alimenter en courant électrique des machines agricoles, les maisons isolées, etc. L'excès d'énergie électrique produite pourrait être mis en réserve en chargeant des accumulateurs, pour être utilisé lorsque le vent tombe. Il est évident que les éoliennes étant peu sûres, ne peuvent jouer qu'un rôle auxiliaire.

De nos jours les gros besoins en énergie obligent les ingénieurs à utiliser toutes les potentialités. Des projets de centrales électriques composées de milliers d'éoliennes sont en voie d'achèvement et ces centrales apporteront leur contribution à l'énergétique.

Les ressources hydrauliques constituent une source d'énergie renouvelable et sont constituées par les différents écoulements d'eau, notamment, les marées océaniques et les cours d'eau s'écoulant jusqu'à la mer. En 1969, les centrales hydroélectriques ont produit en U.R.S.S. 115,2 milliards de kWh, aux U.S.A. 253,3 milliards de kWh ; les ressources potentielles d'énergie hydraulique ne sont utilisées qu'à 10,5 % en U.R.S.S. et à 37 % aux U.S.A.

Ces chiffres correspondent à une production fort importante d'énergie électrique, mais si l'humanité était privée de charbon, de pétrole et d'autres sources d'énergie et ne pouvant compter que sur les seules ressources hydrauliques, aurait amenagé tous les fleuves, la consommation d'énergie électrique par habitant aurait diminuée.

Quant à l'énergie marémotrice, quoique importante, elle est dix fois plus petite que les ressources potentielles des fleuves. L'utilisation de

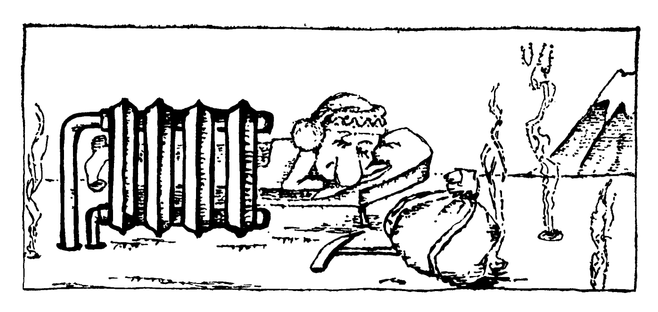


Fig. 6.1

l'énergie des marées est encore insignifiante, par suite du débit pulsé des marées. Néanmoins les ingénieurs français et soviétiques ont trouvé des solutions pratiques pour surmonter ces difficultés, et les usines marémotrices peuvent fournir, aux heures de pointe, la puissance requise. En France on a amenagé l'estuaire de la Rance et en U.R.S.S. on a construit une usine marémotrice dans la région de Mourmansk. Cette dernière est une installation pilote servant de base pour le projet d'usines plus puissantes (10 GW) dans les baies de la Mer Blanche.

Aux grandes profondeurs l'eau des océans a une température qui diffère de 10 à 20 °C de la température à la surface. Cela suffit pour construire une machine thermique dont la source chaude aux latitudes moyennes serait la couche d'eau superficielle et la source froide serait l'eau des profondeurs océaniques. Le rendement d'une telle machine pourrait être de 1 à 2 % ; c'est donc une source d'énergie peu compacte.

Une autre source d'énergie gratuite est l'énergie géothermale. Dans les régions riches en geysers, qui sont peu nombreuses d'ailleurs, on utilise leur chaleur naturelle à des fins industriel-

les. Mais en tout point du globe, à une profondeur de 2 à 3 km, on trouve une température de 150 à 200 °C. Le principe d'une centrale géothermique est évident. Il faut forer deux puits; par l'un on pompe de l'eau chaude et par l'autre on injecte de l'eau froide (fig. 6.1).

COMBUSTIBLE

Toutes les sources d'énergie dont il a été question ci-dessus présentent un avantage incontestable devant les combustibles. Les combustibles doivent être consommés. L'utilisation de l'énergie emmagasinée dans les combustibles (charbon, pétrole, bois) consiste à les brûler, ce qui conduit à une destruction non récupérable des ressources naturelles.

De quelles réserves de combustibles dispose-t-on actuellement sur Terre? Les réserves des combustibles fossiles facilement inflammables dont la houille, le pétrole et le gaz naturel, sont peu abondantes. Avec une consommation du pétrole aussi forte que celle d'aujourd'hui les réserves connues seront épuisées vers le début du XXIe siècle; l'épuisement menace aussi le gaz naturel. Les réserves de houille sont plus importantes, on les estime à dix mille milliards de tonnes. La combustion d'un kilogramme de charbon dégage plusieurs milliers de kilocalories de chaleur. (Comme la qualité des combustibles varie dans de larges limites, cette estimation est en quelque sorte l'unité de mesure ou, comme on dit, l'unité du combustible moyen, que l'on utilise pour comparer entre elles les différentes sources d'énergie.) La réserve énergétique totale de la houille représenterait dans les 10^{20} kcal, ce qui est 1000 fois plus que la consommation annuelle d'énergie.

Une réserve d'énergie pour 1000 ans, c'est peu. Mille ans ne paraissent un temps long qu'en comparaison avec la durée d'une vie humaine; or celle-ci n'est qu'un court moment en comparaison avec la durée de la civilisation et celle du globe terrestre. En outre la consommation d'énergie par habitant ne cesse de croître. Si les seules réserves de combustible se réduisaient à la houille et au pétrole, l'avenir de la situation énergétique sur Terre pourrait être qualifiée de catastrophique.

Mais il n'est nullement obligatoire de n'utiliser que les combustibles chimiques naturels et il est parfois opportun de remplacer le pétrole et le gaz par des combustibles liquides et gazeux synthétiques.

Depuis quelque temps on accorde une attention particulière à la production industrielle de l'hydrogène. Comme combustible l'hydrogène possède de nombreux avantages. On peut le produire en quantités illimitées par différents procédés et comme on le trouve partout, le problème de son transport ne se pose pas. Il se laisse facilement purifier et dans de nombreux cas il est avantageux d'utiliser directement sa chaleur de combustion sans avoir à la transformer en énergie électrique.

Actuellement, on dispose de trois procédés de production d'hydrogène qui semblent compétitifs: l'électrolyse, la décomposition thermochimique et l'irradiation par les neutrons, l'ultraviolet, etc., de composés hydrogénés. Il est économiquement justifié de produire de l'hydrogène à partir de la houille et du pétrole dans les réacteurs nucléaires. Dans ces différents cas il faut envisager le transport de l'hydrogène à son point d'utilisation par des gazoducs, exactement comme pour le gaz naturel. Arrêtons ici notre brève

revue des combustibles chimiques et voyons maintenant la question du combustible nucléaire. Quelles en sont les réserves terrestres, compte tenu de sa faible consommation ? Un kilogramme de combustible nucléaire fournit 2,5 millions de fois plus d'énergie qu'un kilogramme de charbon.

Les estimations montrent que les réserves de combustible nucléaire potentiel (le lecteur comprendra bientôt pourquoi nous parlons de combustible potentiel) s'expriment par les chiffres suivants: près de deux millions de tonnes d'uranium et quatre millions de tonnes de thorium. On produit de l'énergie par désintégration des noyaux atomiques de ces substances dans les réacteurs nucléaires. Il n'est pas exclu que d'autres substances fissiles viendront s'ajouter à l'uranium et au thorium. Le nombre de réactions nucléaires génératrices d'énergie est énorme, et il ne s'agit que de réaliser des réactions en chaîne.

Voyons d'abord ce que nous savons faire aujourd'hui. D'après ce qui a été dit au chapitre précédent, il n'existe dans la Nature qu'une seule substance qui se comporte comme un combustible nucléaire. C'est l'isotope uranium-235. L'uranium que l'on extrait dans les mines contient 99,3 % d'uranium-238 et 0,7 % seulement d'uranium-235.

A première vue, il semblerait que le plus simple serait de séparer l'isotope 235, de construire des réacteurs avec des blocs ou des barres de ce matériau et d'introduire dans le volume de ce réacteur des barres de contrôle qui absorbant les neutrons, permettent de contrôler la réaction nucléaire.

Notons qu'il est désavantageux d'absorber des neutrons pour les empêcher de participer à la réaction en chaîne lorsqu'on veut obtenir le maximum d'énergie par unité de masse de com-

bustible nucléaire en une seconde. Par contre, il est avantageux de ralentir (ou de thermaliser) les neutrons « rapides » formés lors de la fission du noyau jusqu'à ce qu'ils soient animés de vitesses thermiques (neutrons « lents ») pour augmenter le rendement du réacteur, car la probabilité de capture des neutrons lents par les noyaux d'uranium-235 est plus grande.

En dehors de certains prototypes, on utilise toujours en qualité de modérateur de l'eau lourde ou de l'eau ordinaire. L'avantage de l'eau lourde est qu'elle n'absorbe pas du tout les neutrons, mais elle les ralentit beaucoup moins efficacement que l'eau ordinaire.

Ainsi la voie la plus simple serait la séparation de l'isotope uranium-235. On a déjà mentionné que cette séparation était très onéreuse, les procédés chimiques étant inopérants puisqu'il s'agit de substances ayant des propriétés chimiques rigoureusement identiques.

Actuellement le procédé de séparation le plus efficace est fondé sur la centrifugation d'un composé d'uranium gazeux. Le seul composé connu qui soit gazeux à la température ordinaire, est l'hexafluorure d'uranium. La différence des masses des molécules du composé gazeux contenant les isotopes 238 et 235 est tellement petite que la meilleure centrifugeuse n'enrichit le gaz en constituant léger que de 12 %. Pour obtenir de l'uranium contenant 3 % d'isotope 235 (ce combustible convient déjà pour le réacteur nucléaire) il faut recommencer la centrifugation 13 fois de suite. On conçoit que l'obtention de l'uranium-235 pur ne peut être considérée comme une solution pratique du problème du combustible nucléaire.

Mais il existe une considération encore plus importante: sans uranium-235 on ne peut pas transformer l'uranium-238 et le thorium en com-

bustible nucléaire et c'est pour cela qu'on appelle ces matériaux des combustibles potentiels (on les appelle généralement matières fissiles). En ce qui concerne l'isotope 235, ce combustible nucléaire ne pourrait retarder la crise énergétique que de quelques centaines d'années. En supposant que l'humanité devra utiliser les combustibles nucléaires pendant des siècles, il faut chercher une autre issue.

Cette issue est toute trouvée. Le combustible nucléaire (i.e. des substances fissiles) peut être produit dans le réacteur ou la pile. On peut y produire, d'une part, du plutonium-239 à partir de l'uranium-238, et d'autre part, de l'uranium-233 à partir du thorium-232. Mais dans tous les cas on ne peut se passer d'uranium-235.

Les piles qui produisent simultanément de l'énergie et une nouvelle matière fissile, sont appelés couveuses (breeders). Si le taux de conversion est supérieur à l'unité, ces piles produisent plus de combustible qu'elles n'en consomment; on les appelle alors des surgénératrices.

On dispose donc de moyens techniques permettant d'utiliser toutes les réserves d'uranium et de thorium. Dans ces conditions les quantités disponibles de combustible nucléaire couvriront les besoins de l'humanité pendant plusieurs millénaires.

Néanmoins la mise dans le circuit de consommation des combustibles de l'uranium et du thorium ne met pas encore l'humanité à l'abri d'une pénurie d'énergie, puisque les réserves de minerais ne sont pas inépuisables.

Tout autre chose est la mise en œuvre des réactions de fusion (ou réactions thermonucléaires). Si on arrivait à contrôler les réactions de fusion de noyaux légers (i.e. leur agglomération avec création de noyaux plus lourds) de telle

façon que la réaction soit auto-entretenue, on pourra dire que le problème énergétique est résolu. Quelles sont les perspectives de cette voie? Dernièrement les physiciens sont arrivés à produire des plasmas portés à des températures de l'ordre de 60 millions de kelvins. C'est à des températures de cet ordre que se réalisent les réactions de fusion. Mais on ne sait pas encore comment faire pour que ces réactions soient auto-entretenues de sorte qu'on ne sait pas encore comment réaliser un réacteur thermonucléaire.

L'Océan Mondial est une réserve pratiquement illimitée d'énergie thermonucléaire qui pourrait couvrir tous les besoins en énergie pendant un temps supérieur à l'âge du système solaire.

C'est tout ce qu'on dira ici à propos des combustibles et il faut examiner maintenant les équipements utilisés pour brûler les combustibles et produire de l'énergie.

CENTRALES ÉLECTRIQUES

Il est évident qu'on peut citer de nombreux exemples où l'énergie est utilisée directement sans passer par le stade de production du courant électrique. On brûle le gaz dans les réchauds de cuisine, les fusées sont propulsées en brûlant des combustibles et on trouve encore de vieilles machines à vapeur. Il est souvent rationnel de transformer directement en mouvement l'énergie obtenue à partir de sources d'énergie gratuite, le vent par exemple.

Mais dans la majorité des cas on doit disposer du courant électrique, que ce soit pour l'éclairage, pour l'alimentation des moteurs électriques, pour les transports, les équipements de soudure, les fours électriques, ou pour la charge des accumulateurs, etc. En tout cas la transmission

d'énergie à distance ne se fait que sous forme d'énergie électrique. C'est pour toutes ces raisons que la « superstar » de la technique moderne est la centrale électrique, dispensatrice d'énergie.

Il existe à ce jour deux procédés industriels de mise en mouvement des parties tournantes des machines électriques produisant le courant électrique. Lorsqu'on met en œuvre le travail produit par une chute d'eau, il s'agit de centrales hydroélectriques et lorsque la force motrice est fournie par la vapeur faisant tourner les aubes des turbines, il s'agit de centrales thermiques.

Une classe spéciale de centrales thermiques est la classe des centrales nucléaires; la seule différence entre une centrale thermique ordinaire et une centrale nucléaire tient aux combustibles utilisés, car c'est avec les combustibles fossiles et les combustibles fissiles qu'on produit de la chaleur qui est utilisée pour produire de la vapeur.

Il existe aussi des centrales électriques à production simultanée d'énergie électrique et d'énergie thermique (eau chaude et vapeur).

L'utilisation de l'énergie hydraulique remonte très loin dans le temps. La roue à aubes des moulins à eau est l'ancêtre des turbines hydrauliques modernes. Le jet d'eau qui frappe les aubes de la turbine lui communique une partie de son énergie cinétique et met la roue en mouvement.

Il n'est pas facile de trouver la répartition des aubes assurant à la turbine le rendement maximal. La solution de ce problème dépend des caractéristiques de la chute d'eau. L'efficacité sera d'autant plus grande que la hauteur de chute de l'eau (la hauteur de chute atteint parfois 300 m) et la puissance du jet sont grandes. Grâce aux progrès technologiques, les turbines hydrauliques modernes sont conçues pour des puissances

unitaires dépassant 500 MW. Comme ces puissances correspondent à de petites fréquences de rotation (de l'ordre de 100 tours/mn), les turbines modernes ont de grandes dimensions et un poids impressionnant.

Suivant la direction du jet d'eau dans la turbine, on distingue les turbines axiales et les turbines Francis. En U.R.S.S., on exploite des turbines Francis d'une puissance de 508 MW dont la roue a un diamètre de 7,5 m.

Les centrales hydrauliques produisent l'énergie électrique la moins chère, mais leur aménagement exige des investissements initiaux plus grands que pour les centrales thermiques et leur construction exige des délais plus longs. Les turbines hydrauliques entraînent des alternateurs; ce sont des machines synchrones à axe vertical dont le rotor a un diamètre 7 à 10 fois plus grand que sa longueur et dans certains cas dépasse 15 m. Ces dimensions sont nécessaires pour que l'alternateur fonctionne de façon stable lors des variations de la vitesse de rotation de la turbine. Le rotor de l'alternateur comporte un grand nombre de pôles saillants, 72 dans le cas des alternateurs équipant la centrale hydroélectrique du Dniepr. Pour alimenter l'enroulement des pôles en courant continu on utilise une excitatrice qui est un générateur à courant continu spécial. Les fréquences de rotation des alternateurs sont petites — de 80 à 250 tours/mn.

La fréquence de rotation de l'alternateur de la centrale hydroélectrique de Krasnoïarsk (d'une puissance de 500 MW) est égale à 93,8 tours/mn, le diamètre de son rotor est égal à 16 m et sa masse est de 1640 t. Pour la centrale Saïano-Chouchenskaïa on a mis sur le chantier un alternateur de 650 MW.

On a déjà noté que l'utilisation de l'énergie

hydraulique affectait l'environnement, mais les centrales hydrauliques sont préférables aux centrales thermiques tout d'abord parce qu'elles ne consomment pas de combustibles fossiles dont les réserves naturelles sont très petites. D'autre part les centrales thermiques présentent le grave inconvénient de dissiper inutilement une partie importante de l'énergie produite par la combustion du combustible.

Néanmoins, près de 80 % de l'énergie électrique sont élaborés dans les centrales thermiques à l'aide de turbogénérateurs actionnés par la vapeur.

Pour améliorer le rendement de générateurs, il faut que la température de la vapeur soit aussi grande que possible. On conçoit qu'on n'y arrive qu'en augmentant simultanément la pression de la vapeur. Dans les centrales thermo-électriques modernes d'une puissance de 200 à 300 MW, les turbines sont actionnées par de la vapeur dont la température est égale à 565 °C et la pression à 24 MPa.

Pourquoi faut-il chercher à augmenter la température de la vapeur ? Dans une turbine à vapeur on met à profit pratiquement le même phénomène qui fait sauter en l'air le couvercle d'une bouillote lorsque l'eau boût. Autrement dit, dans une turbine à vapeur, l'énergie thermique est transformée en énergie mécanique, puis cette dernière est transformée en énergie électrique. On démontre que lors de la première transformation la perte d'énergie ne peut être inférieure au rapport de la température ambiante à la température de la vapeur (exprimée en kelvins).

Il est regrettable que dans les équipements dont on dispose aujourd'hui il faille passer par le « stade thermique » pour produire de l'énergie disponible. Cette transformation donne toujours

lieu à d'énormes pertes d'énergie et la centrale électrique idéale de demain devrait être telle que l'énergie de toute forme y soit directement transformée en énergie électrique. Mais comme ce grand problème n'est pas encore résolu, on en est réduit à augmenter toujours davantage la température de la vapeur, du gaz ou du plasma.

Malgré toutes les difficultés on arrive à porter à 40 % le rendement des centrales thermiques. Les générateurs mus par les turbines à vapeur sont des machines électriques à arbre horizontal. Le rotor est fabriqué avec les extrémités de l'arbre sous forme d'une pièce forgée en acier à turbine spécial prévu pour pouvoir supporter les très grandes contraintes mécaniques qu'imposent les très grandes fréquences de rotation des machines modernes (jusqu'à 3000 tours/mn). Pour la même raison le rotor ne doit pas avoir de pôles saillants. Sur une partie de sa surface cylindrique on ménage des encoches où sont logés les bobinages d'excitation. Dans les encoches du stator on dispose les bobinages triphasés pour le courant alternatif.

Comme le diamètre du rotor doit être limité par suite de grandes contraintes mécaniques qui y apparaissent, pour obtenir une puissance suffisante on est amené à allonger la machine.

Les premiers groupes turbo-alternateurs soviétiques de 500 kW ont été fabriqués en 1925 à l'usine « Elektrosila » de Léningrad. En 1964, la même usine fabriquait des groupes turbo-alternateurs d'une puissance de 500 000 kW.

Comme on cherche à tirer d'une seule machine une puissance toujours plus grande et qu'on ne peut plus augmenter ses dimensions, déjà très grandes, on doit recourir à divers moyens compliqués. Ainsi pour réduire les pertes dans les enroulements du stator, on les réalise en conducteurs creux en cuivre dans lesquels on fait cir-

culer l'eau de refroidissement. Les enroulements d'excitation sont refroidis par de l'hydrogène sous une pression de 4 atm. Comme l'hydrogène a une densité quatorze fois plus petite que celle de l'air, son utilisation pour le refroidissement permet d'accroître de 15 à 20% la puissance du turbo-alternateur.

En U.R.S.S., le plan quinquennal pour 1981-1985 prévoit la mise en fabrication de groupes turbo-alternateurs pour centrales thermiques et atomiques d'une puissance de 1 à 1,5 millions de kW.

On a construit en U.R.S.S. un prototype particulièrement intéressant de centrale électrique, qui est dénommé U-25 et qui fournit près de 7000 kW d'énergie électrique. Actuellement c'est le plus grand générateur magnétohydrodynamique du monde. On les appelle générateurs MHD; ces générateurs n'ont pas de pièces tournantes.

Le principe des générateurs MHD est fort simple. Un gaz ionisé (jet de plasma) animé d'une grande vitesse est soumis à un champ magnétique transversal. Les ions y sont soumis à la force de Lorentz. L'intensité du champ électrique induit est proportionnelle à la vitesse du flux d'ions et à l'induction magnétique. La f.é.m. est dirigée perpendiculairement à la direction du flux ionique et c'est suivant cette direction que circule le courant électrique en passant par un circuit de charge extérieure. Les électrodes qui recueillent les charges électriques sont placées en contact direct avec le plasma.

L'énergie électrique provient de la chute d'énergie du jet de gaz ionisé. Le rendement d'un générateur MHD peut être supérieur à 60 %.

Le coût de l'énergie électrique produite par un générateur MHD dépend du mode de production du champ magnétique. L'intensité du champ

magnétique doit être très grande; on pourrait produire un champ d'une intensité suffisante à l'aide d'un électro-aimant à enroulement en cuivre, mais il serait de très grandes dimensions et très coûteux et de plus consommerait beaucoup d'énergie électrique. C'est pour cela que dans les générateurs MHD on produit le champ magnétique à l'aide d'électro-aimants à enroulements supraconducteurs. Ces électro-aimants permettent de créer un champ magnétique de grande intensité avec une consommation d'énergie et un échauffement faibles. Les calculs montrent que les frais qu'occasionne la réalisation de températures proches de zéro absolu sont justifés.

Ce bref exposé des voies traditionnelles de production d'énergie électrique montre que leurs potentialités sont loin d'être épuisées; néanmoins il est douteux que l'humanité puisse satisfaire longtemps à ses besoins par ces procédés.

Non seulement les réserves de combustibles et les possibilités d'aménagement hydroélectrique sont presque épuisées, mais on doit penser encore à ce que la construction de chaque nouvelle centrale augmente la pollution de l'environnement. L'écologie démontre qu'il faut limiter les interventions de l'homme dans la vie des fleuves. On doit noter d'autre part que les rejets de cendres par les centrales thermiques sont déjà trop importants. L'atmosphère terrestre est polluée par an par 150 millions de tonnes de cendres et par près de 100 millions de tonnes de soufre. L'accroissement de la teneur de l'atmosphère en gaz carbonique est particulièrement nocif. Chaque année la teneur en gaz carbonique s'accroît de 20 milliards de tonnes. Au cours des 100 dernières années la teneur de gaz carbonique dans l'atmosphère s'est accrue de 14 %.

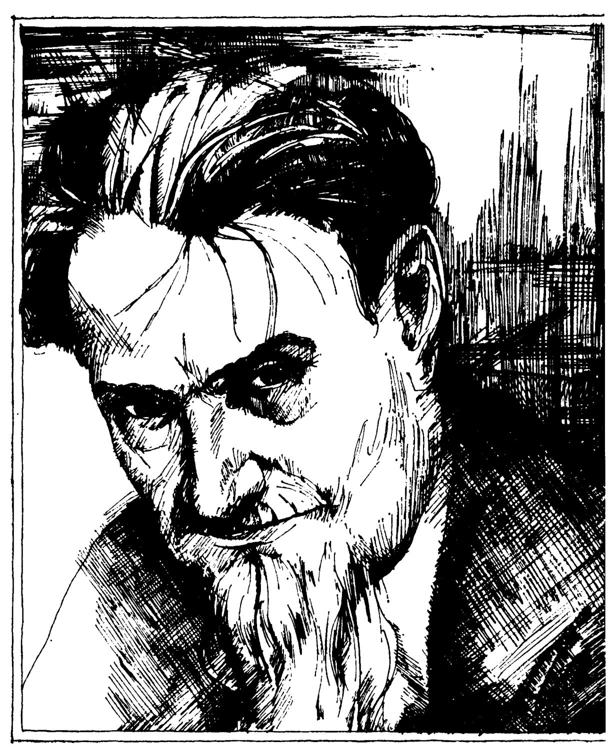
Cet accroissement de la teneur en gaz carboni-

que est dû à deux causes principales : la déforestation et surtout la pollution de l'atmosphère par les gaz produits par la combustion des combustibles usuels. Cette croissance continue de la teneur de gaz carbonique peut entraîner une élévation de 1,5 à 3 kelvins de la température de l'atmosphère terrestre. On aurait tendance à penser que c'est bien peu, mais une telle élévation de température suffirait pour provoquer la fonte des glaces de la calotte polaire et empêcher sa reconstitution. Les climatologues estiment qu'on ne doit pas permettre que l'accroissement ultérieur de la teneur en gaz carbonique dépasse quelques dizaines de pour cent.

RÉACTEURS NUCLÉAIRES

Nous avons déjà noté que les centrales nucléaires font partie de la classe des centrales thermiques. Elles s'en distinguent par le procédé de production de la vapeur d'eau qui met en mouvement les aubes de la turbine. Il est parfaitement justifié de remplacer le terme de « réacteur nucléaire » par celui de « chaudière nucléaire », ce qui permet de mettre en relief la parenté qui existe entre ces deux procédés de production d'énergie.

On construit les réacteurs nucléaires en forme de bâtiment cylindrique, à murs très épais et construits avec des matériaux absorbant les neutrons et les rayons gamma. Les dimensions d'un réacteur, pouvant produire, disons, 1000 MW d'énergie électrique, dépendent du combustible nucléaire, du procédé de modération des neutrons et du procédé d'évacuation de la chaleur. Mais dans tous les cas les dimensions des réacteurs sont considérables ; leur hauteur est celle d'une maison



IGOR VASSILIÉVITCH KOURTCHATOV (1903-1960)
Célèbre physicien soviétique, organisateur remarquabl
qui dirigeait les travaux sur l'étude du problème atomi
que en Union Soviétique. Il commença son activité scien
tifique dans le domaine de la physique du solide, créa l
théorie des ferro-électriques. Au début des années 3
I. V. Kourtchatov s'occupa de recherches dans le domain
de la physique du noyau atomique. Sous sa direction fu
rent réalisés d'importants travaux concernant l'étude d
l'isomérie nucléaire, l'absorption résonnante des neu
trons, la radioactivité artificielle.

de 5 à 10 étages et leur diamètre est de 10 m environ.

L'énergétique nucléaire commence à se développer aussitôt après la deuxième guerre mondiale. En U.R.S.S., ces importantes recherches furent conduites par I. V. Kourtchatov, remarquable savant et manager.

Aussi bien en U.R.S.S. que dans les autres pays, on étudia différents prototypes de réacteurs. Le premier problème qui se pose est celui de la composition isotopique de l'uranium ou tout autre combustible nucléaire. Après cela les ingénieurs doivent décider sous quelle forme sera utilisé le combustible nucléaire — sous forme d'une solution de sels d'uranium ou sous forme de blocs solides. Le combustible solide peut être produit sous des formes géométriques différentes — barres ou crayons de grande longueur, ces derniers sont préférables. La géométrie de la disposition des éléments combustibles revêt une grande importance. Le calcul permet de trouver la disposition la plus convenable des barres de contrôle qui absorbent les neutrons. Leur déplacement (automatique) permet de contrôler le facteur de multiplication des neutrons.

Les différences entre le comportement des neutrons lents (ou thermiques) et des neutrons rapides permettent de classer tous les types de réacteurs en deux catégories: les réacteurs à modérateurs et les surgénérateurs ou « breeders ».

Les réacteurs à modérateurs peuvent fonctionner avec de l'uranium naturel. La quantité de modérateur doit suffire pour empêcher qu'un nombre trop grand de neutrons soient absorbés par les noyaux d'uranium-238, qui sont 140 fois plus nombreux que les noyaux d'uranium-235. Si la quantité de modérateur est trop petite, les neutrons ne pourront pas être ralentis jusqu'à

la vitesse thermique et seront absorbés par les noyaux d'uranium-238, ce qui bloquera la réaction en chaîne. Un réacteur utilisant l'uranium naturel faiblement enrichi en uranium-235 pourra cependant produire un nouveau combustible — le plutonium, mais la quantité de celui-ci sera beaucoup plus petite que la quantité de noyaux « brûlés ».

Présentement les centrales nucléaires sont équipées de réacteurs à neutrons thermiques. On utilise le plus souvent quatre types de réacteurs : la pile modérée et refroidie par l'eau ordinaire ; la pile modérée au graphite et refroidie par eau ; la pile modérée à l'eau lourde et refroidie par l'eau ordinaire, et enfin la pile modérée au graphite et refroidie par un gaz.

La raison de ce que les techniciens de l'énergétique atomique ont concentré leurs efforts sur les réacteurs à neutrons lents tient à ce que l'enrichissement de l'uranium naturel en uranium-235 est une tâche très ardue. Mais il ne faut pas oublier que si on n'utilisait que l'isotope d'uranium-235, on ne pourrait pas mettre en œuvre les énormes réserves de combustible nucléaire potentiel.

De nos jours on a tendance à utiliser des réacteurs nucléaires fonctionnant avec un combustible fortement enrichi et sans modérateur.

Supposons que la chaudière nucléaire soit chargée d'un mélange dans lequel à une partie d'uranium-235 correspond une partie d'uranium-238. Dans ces conditions le nombre de neutrons captés par l'uranium-238 peut être plus grand que le nombre de neutrons provoquant la rupture des noyaux d'uranium-235 et assurant l'évolution de la réaction en chaîne. Un tel réacteur constitue un surgénérateur. Suivant la géométrie de répartition des barreaux ou des briquettes de combustible fissile et de matériau fertile, on

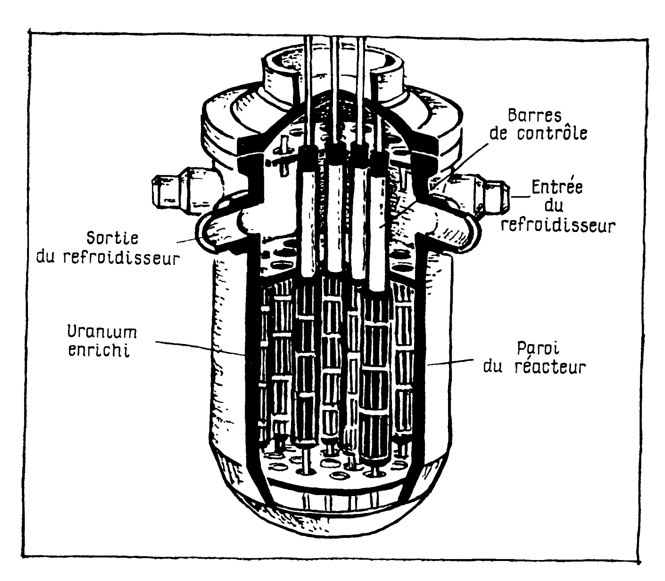


Fig. 6.2

réalise des surgénérateurs contenant différentes proportions de combustible fissile et de matériau fertile et ayant des taux de conversion différents.

Pour donner une idée des paramètres des réacteurs nucléaires, examinons deux exemples.

La figure 6.2 représente une coupe du réacteur nucléaire équipant les sous-marins atomiques américains. Le refroidissement est assuré par de l'eau ordinaire. Comme l'eau ordinaire capte les neutrons près de 600 fois plus efficacement que l'eau lourde, ce réacteur ne peut fonctionner qu'avec de l'uranium-238 enrichi d'uranium-235. Au lieu de la teneur naturelle d'uranium-235 égale à 0,72 %, le combustible enrichi en contient de 1 à 4 %. Un réacteur pouvant fournir 1100 MW

d'énergie électrique a un diamètre de 5 m, une hauteur de 15 m et une épaisseur de paroi égale à 30 cm (de la dimension d'une maison à 4 étages). Avec une charge de 80 t d'oxyde d'uranium contenant 3,2 % d'uranium-235, le réacteur pourra fonctionner pendant 10 à 12 mois (après ce laps de temps il faut changer les éléments combustibles). La pression de l'eau qui circule dans le réacteur est proche de 300 atm et sa température à la sortie du réacteur atteint 320 °C. On laisse l'eau chaude se vaporiser et on envoie la vapeur sur les aubes de la turbine.

Examinons maintenant le projet du surgénérateur français dénommé Superphénix.

On se propose d'utiliser comme combustible un mélange de plutonium-239 et d'uranium-238. Aucun modérateur n'étant prévu, les neutrons conserveront la vitesse qu'ils possédaient à l'instant de la fission qui leur a donné naissance jusqu'à ce qu'ils rencontrent un autre noyau de combustible fissile.

Les réacteurs à neutrons rapides sont très compacts. Le volume du cœur du réacteur ne dépasse pas 10 m^3 et par suite la quantité de chaleur produite par unité de volume est très grande.

On ne peut utiliser l'eau comme fluide caloporteur puisque l'eau ralentit les neutrons. On utilisera donc du sodium liquide. A la pression atmosphérique le sodium fond à 98 °C et bout à 882 °C. Pour des raisons techniques la température du sodium liquide ne doit pas dépasser 550 °C. Il est donc inutile d'augmenter la pression du fluide de refroidissement, comme c'est le cas avec l'eau.

Le Superphénix doit avoir un diamètre intérieur de 64 m et une hauteur de 80 m. C'est donc un édifice important comparable à une maison à 19 étages. Le cœur du réacteur est constitué

par des crayons de combustible de 5,4 m de longueur, groupés en faisceaux formant un prisme hexagonal. Les crayons du combustible fissile alternent avec les barres de contrôle.

La place nous manque pour décrire le circuit de refroidissement du cœur du réacteur (ce n'est d'ailleurs pas utile dans un livre de physique). Le refroidissement est réalisé en trois étapes.

Le fluide de refroidissement primaire est du sodium liquide; il emporte la chaleur dégagée dans le cœur du réacteur et la transporte dans un échangeur où le sodium primaire cède la chaleur à un circuit de sodium secondaire. Le circuit du sodium secondaire assure le transfert de la chaleur à un circuit à eau-vapeur. La vapeur produite sert à actionner une turbine à vapeur.

Selon le projet, cette installation doit fournir 3000 MW de puissance thermique et 1240 MW de puissance électrique.

Il faut reconnaître qu'il est décevant qu'il faille passer par le stade thermique pour transformer l'énergie nucléaire en énergie électrique. C'est comme si on installait un moteur d'automobile sur une charrette. Mais on n'a aucune idée de la manière dont il faut s'y prendre pour éliminer l'étape thermique, qui est à l'origine des difficultés majeures auxquelles se heurte la construction des centrales nucléaires. Aux inconvénients communs à toutes les centrales thermiques vient s'ajouter ici la nécessité d'utiliser des échangeurs intermédiaires, afin d'exclure toute éventualité de contamination radioactive de la vapeur envoyée dans la turbine.

Donnons encore quelques précisions relatives au projet Superphénix. Le flux maximal de neutrons par cm^2 et par seconde doit être égal à $6{,}2 \cdot 10^{15}$. Le taux de conversion doit

être égal à 1,24. Le renouvellement du combustible ne devra se faire qu'une fois par an. Le débit massique du sodium liquide dans le circuit primaire doit être égal à 16,4 t/s. La vapeur surchauffée sortant des générateurs de vapeur devra avoir une température de 490 °C sous une pression de 18 MPa.

On doit encore dire quelques mots au sujet des « cendres » du combustible nucléaire. La fission des noyaux du combustible nucléaire donne naissance à un grand nombre d'isotopes radioactifs par un processus incontrôlable; mais en plaçant dans le réacteur n'importe quelle substance, celle-ci captera des neutrons et on obtiendra les isotopes correspondants.

Il va de soi que l'on peut produire des isotopes radioactifs dans les accélérateurs en bombardant des substances convenables par des protons ou par des noyaux d'autres éléments.

Le nombre d'éléments artificiels connus à ce jour est déjà fort important. Les cases vides du tableau de Mendéléev ont été remplies; les éléments dont les numéros d'ordre sont 61, 85 et 87 n'ont pas d'isotopes stables et c'est pour cela qu'on ne les trouve pas dans la Nature. On arriva même à prolonger le tableau de Mendéléev jusqu'au numéro 105; les éléments situés au-delà de l'élément 92 sont dits éléments transuraniens; chacun de ces éléments transuraniens existe sous forme de plusieurs isotopes. A part les nouveaux éléments chimiques, on a produit de nombreux isotopes radioactifs des éléments existant dans l'écorce terrestre sous forme d'isotopes stables.

Depuis de nombreuses années les isotopes radioactifs trouvent de nombreuses applications: stérilisation des aliments par les rayons gamma,

défectoscopie, élaboration de générateurs d'énergie électrique utilisant les électrons qui sont éjectés dans les réactions de transmutation, etc.

Malheureusement le profit que l'on retire de la mise en œuvre des isotopes radioactifs est comparable aux inconvénients dont ils sont cause puisque les ingénieurs doivent élaborer des moyens efficaces de protection des hommes contre les rayonnements radioactifs.

Les cendres du combustible nucléaire contiennent jusqu'à 450 espèces d'atomes (ou nucléides) parmi lesquels on trouve du neptunium-239 et de l'uranium-237 qui se transmutent en plutonium-239 et neptunium-237.

A la différence du charbon ou du pétrole, le combustible nucléaire ne brûle jamais complètement. Dans certains cas les réacteurs nucléaires fonctionnent avec du combustible enrichi contenant de 2,5 à 3,5 % d'uranium-235. A un certain moment, le réacteur cesse de produire de l'énergie parce que le processus de fission donne naissance à de nombreux isotopes qui captent les neutrons et bloquent les réactions de fission. Lorsqu'on arrête un réacteur, le combustible qu'on en retire contient près de 1 % d'uranium-235 et un peu moins de plutonium-239.

Il est bien évident qu'il serait déraisonnable de jeter au rebut des cendres contenant des quantités aussi importantes de combustible. Il serait donc opportun d'associer aux centrales nucléaires une usine chimique complètement automatisée puisque les matériaux qui y seront traités sont fortement radioactifs. Il est indispensable de protéger le personnel contre une irradiation par les rayons gamma.

Dans cette usine chimique les éléments fissiles, après traitement, doivent être broyés et dissous et on doit en extraire du combustible pur

(uranium et plutonium) qui servira à la fabrication d'éléments combustibles.

Après cela il reste en résidu de grandes quantités de solution radioactive ; il faut assurer son enfouissement dans des conditions telles que ces déchets radioactifs ne causent aucun incident pendant les siècles.

Les spécialistes font preuve d'optimisme et estiment qu'en déposant les fûts de solution radioactive sous terre à une profondeur de 1 km dans des endroits convenablement choisis, la sécurité sera complète. Le choix des lieux d'enfouissement doit être fait par les géologues ; il est évident que les régions d'activité séismique sont à exclure ; d'autre part, l'absence d'écoulements d'eaux souterraines est une condition tout aussi obligatoire. Les zones de gisements de sels gemmes semblent satisfaire à ces desiderata. Mais il ne s'agit pas de précipiter les fûts dans des puits de 1 km de profondeur ; pour que la chaleur dégagée par chaque fût puisse se dissiper, il faut qu'ils soient espacés de 10 m au moins.

ÉNERGIE THERMONUCLÉAIRE

On a déjà indiqué qu'il existe une similitude entre les réactions chimiques et les réactions nucléaires. Comme de la chaleur peut être libérée aussi bien dans les réactions de décomposition que dans les réactions où deux molécules s'unissent pour n'en former qu'une, on peut s'attendre à ce que les noyaux atomiques se comportent de la même façon.

Connaissant les masses des noyaux atomiques, il est facile de prédéterminer les réactions de fusion des noyaux qui seront énergétiquement rentables.

La masse du noyau de deutérium (deuton) est égale à 2,0146 u.m.a. Par fusion de deutons, on obtiendrait ^4He. Or la masse de ^4He est égale à 4,0038 et non pas à 4,0292. L'excès de masse égal à 0,0254 u.m.a. est équivalent à une énergie de 25 MeV environ, soit à $4\cdot10^{-11}$ J. Un gramme de deutérium contient $0,3\cdot10^{24}$ atomes. Par conséquent, si cette réaction de fusion était réalisée, pour 2 g de substance mise en jeu on obtiendrait une énergie de 10^{13} J!.. Il apparaît ainsi que ce sont les réactions de fusion des isotopes lourds de l'hydrogène — deutérium et tritium, qui offrent les plus grandes potentialités. L'hydrogène ordinaire convient également.

Les termes que nous utilisons sont affaire de convention. Dans tous les cas il s'agit d'énergie nucléaire, mais par tradition l'énergie libérée dans les réactions de fission est appelée énergie atomique et l'énergie libérée dans les réactions de fusion des noyaux est appelée énergie thermonucléaire. Tout cela n'est pas bien logique, mais c'est admis.

Les réactions thermonucléaires pourraient satisfaire les besoins en énergie de l'humanité pendant des millions d'années sans que baisse le niveau de l'eau de l'Océan Mondial. On peut donc dire que l'énergie thermonucléaire est de l'énergie gratuite.

Mais il y a loin de l'idée à la réalisation pratique. En effet comme tous les noyaux atomiques portent des charges positives, pour les amener à presque se toucher, il faut fournir une énergie énorme.

Où puiser l'énergie nécessaire? La seule possibilité qui s'offre est de faire passer la substance à l'état de plasma, ce qui revient à arracher tous les électrons des noyaux et à élever ensuite la température du plasma jusqu'à ce que les noyaux

entrent en collision les uns avec les autres (ce qui implique qu'ils se trouvent séparés de 10^{-13} cm seulement) en dépit de la répulsion électrique.

Les résultats des calculs sont décevants. Le lecteur est invité à faire lui-même le calcul de l'énergie de répulsion électrostatique par la formule e^2/r, et à évaluer ensuite les températures auxquelles on doit porter le plasma (pour cela il faut se remémorer la formule qui relie la température à l'énergie cinétique de n'importe quelle particule). On trouve ainsi que le plasma doit être porté à une température de plusieurs dizaines de millions de kelvins.

Il faut donc créer un plasma à très haute température. On dispose pour cela de deux voies différentes. L'une est connue des physiciens depuis près de vingt ans et l'autre est beaucoup plus récente.

La première voie d'élaboration d'un réacteur thermonucléaire consiste à enfermer le plasma dans une « bouteille magnétique ».

Lorsqu'on applique à un tube à décharge un champ magnétique parallèlement au champ électrique, on provoque un pincement du plasma. On sait que dans ces conditions les particules chargées constituant le plasma décriront des trajectoires en forme d'hélice. On peut poser que les mouvements des particules se composent pour donner un courant superficiel circulaire. Plus grande est l'intensité du champ magnétique, plus petit sera le diamètre du pincement. La force exercée par le champ magnétique sur le courant des particules chargées est la cause du pincement et ainsi le plasma est confiné loin des parois du tube à décharge.

En principe, il est donc possible de créer un plasma rigoureusement confiné.

Les calculs montrent que pour une pression initiale d'hydrogène de l'ordre de 0,1 mm Hg, avec un rayon de cordon de plasma confiné égal à 10 cm et une intensité du courant de décharge égale à 500 000 A, la température du plasma doit être suffisante pour initier la fusion des noyaux.

La réalisation pratique d'une réaction thermonucléaire contrôlée se heurte à de très grosses difficultés. La raison en est que le cordon de plasma est pour différentes raisons très instable et s'étale presque instantanément. Le problème ne peut être résolu que si on crée une « bouteille magnétique » à « réaction »: il faut que les fluctuations aléatoires qui provoquent l'étalement du cordon fassent apparaître des forces s'opposant à l'étalement.

En été 1978, un groupe de physiciens américains de l'Université de Princeton ont réussi à échauffer le plasma jusqu'à 60 millions de kelvins. C'est en utilisant une « bouteille magnétique » Tokamak élaborée en U.R.S.S. (il en a été question dans le livre 3) qu'ils arrivèrent à ce résultat. Cette température est suffisante pour donner lieu à une fusion des noyaux de deutérium et de tritium.

C'est une belle réussite. Mais le pas suivant n'a pas encore été fait. On n'arrive pas à maintenir pendant un temps suffisant le plasma chaud et on ne voit pas encore très bien quelle solution technique employer. Il n'est pas exclu que la réalisation des réactions thermonucléaires contrôlées soit une technique extrêmement coûteuse. Mais en tout cas les recherches se poursuivent.

Des recherches sont en cours sur la mise en œuvre des rayonnements lasers pour réaliser une fusion contrôlée. On dispose actuellement de lasers émettant des rayonnements d'une puissance de 10^{12} watts, qui peuvent être envoyés sous

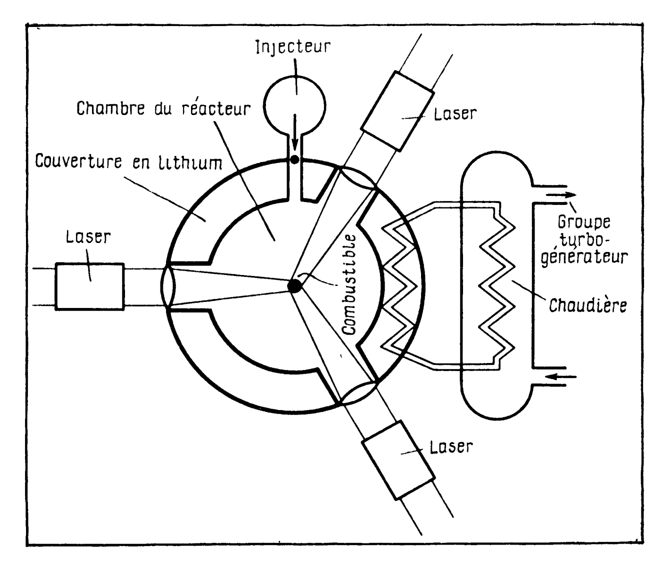


Fig. 6.3

forme d'impulsions lumineuses d'une durée de 10^{-9} à 10^{-10} s sur la substance que l'on désire transformer en plasma. Lorsqu'un rayonnement aussi puissant tombe sur un corps solide, celui-ci s'ionise instantanément et passe à l'état de plasma. Ce qu'il faut réaliser, c'est qu'un plasma de deutérium-tritium soit porté à une température de 10^8 K et que cette température se maintienne jusqu'à ce que démarre une réaction de fusion en chaîne. Pour y arriver il faut que la densité du plasma soit aussi grande que possible afin d'accroître le nombre de chocs entre les noyaux.

C'est sur la base de telles considérations qu'a été conçu le réacteur expérimental dont le schéma est représenté sur la figure 6.3. Une bille solide (congelée) d'un mélange d'isotopes d'hy-

drogène tombe en chute libre dans un récipient où règne un vide poussé. Lorsque la bille passe par le centre du récipient, des lasers de grande puissance sont actionnés et les substances composant la bille solide sont transformées en plasma. Pour que le réacteur puisse débiter de l'énergie, il faut que pendant le temps séparant le début et la fin de la réaction soit libérée une quantité d'énergie suffisante pour maintenir la température nécessaire pour que la réaction ait lieu. Les calculs montrent que la densité du plasma doit être plus grande de 10^3 à 10^4 fois que la densité du corps solide ; cela signifie que 1 cm^3 de plasma devrait contenir 10^{26} particules. Le rayonnement laser est en mesure de réaliser une telle compression.

En principe ce procédé permet d'obtenir et la densité et la température requises. Une fois que ce sera fait, que se passera-t-il ensuite? L'énergie libérée lors de la fusion des noyaux sera transmise aux neutrons libérés dans la réaction. Ces neutrons tomberont sur une couverture en lithium revêtant le récipient. Le lithium transférera l'énergie reçue à travers un système d'échangeurs de chaleur à un groupe turbogénérateur. Une partie des neutrons réagira avec le lithium en donnant du tritium qui est le combustible nucléaire nécessaire au processus thermonucléaire.

Le principe est fort simple. Mais on est encore loin de sa réalisation pratique et on risque encore de se heurter à des difficultés imprévues. On ne saurait énumérer les conditions auxquelles devrait satisfaire l'installation qui vient d'être esquissée pour qu'elle fonctionne en qualité de source d'énergie. Les savants sont persuadés que dans ces recherches où une puissance aussi grande sera concentrée dans des volumes aussi

petits, on peut s'attendre à la découverte de nouveaux phénomènes.

ÉNERGIE SOLAIRE

On connaît depuis longtemps le procédé de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique à l'aide d'éléments photoélectriques. Mais ce n'est que tout récemment qu'on envisagea la possibilité de mettre à profit ce phénomène pour la production d'énergie dans une centrale électrique. A première vue cette idée peut sembler invraisemblable. Pour construire une centrale électrique d'une puissance de 1000 MW, il faudrait que les photopiles solaires couvrent une superficie de 6×6 km² dans une région aussi ensoleillée que le Sahara. En Europe centrale où le nombre de journées ensoleillées est plus petit, il faudrait doubler (au moins) cette superficie. Le lecteur est en droit de s'exclamer: « c'est de la science-fiction et cela coûterait extrêmement cher ».

C'est une objection parfaitement valable. Mais d'un autre côté ce procédé de production d'énergie électrique a des avantages vraiment extraordinaires. Aucune substance terrestre n'y est consommée et aucun rebut ne vient polluer l'environnement. Ces deux arguments sont tellement importants qu'on a décidé d'entreprendre des recherches sérieuses en vue d'élaborer des technologies de fabrication de photopiles solaires bon marché ainsi que des modes d'implantation optimale des photopiles avec focalisation des rayons solaires. De nombreux savants sont persuadés que ce problème mérite qu'on lui accorde une attention particulière et que ce procédé servira de base aux centrales électriques de l'avenir. L'auteur de ce livre partage ce point de vue et

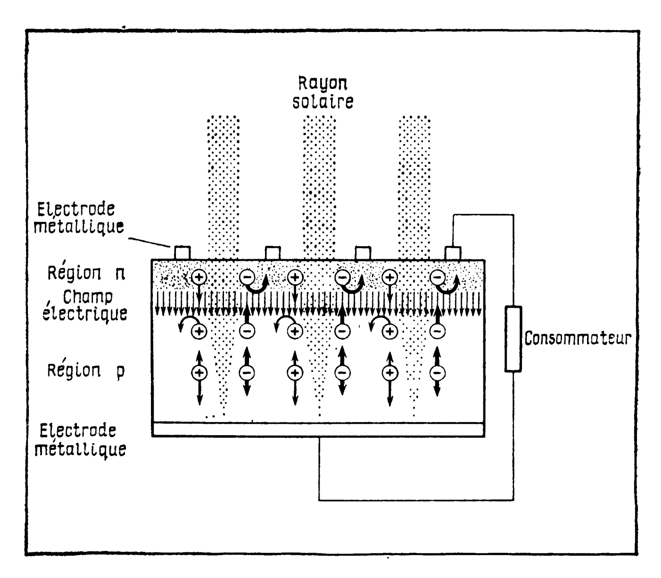


Fig. 6.4

il ne sera pas étonné si d'ici quelques années ce problème devenait d'une brûlante actualité.

Cet optimisme ne serait-il pas prématuré? Quel est l'état de la question et quelles cellules photovoltaïques peut fournir l'industrie aujourd'hui même.

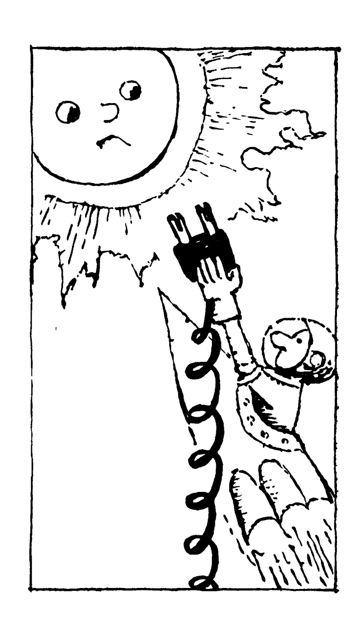
La figure 6.4 illustre le principe de la transformation de l'énergie solaire en courant électrique. Chaque cellule est formée d'une plaquette de semiconducteur à jonction *p-n* sur les faces de laquelle se trouvent des électrodes métalliques. Sous l'action de la lumière solaire des électrons et des trous libres sont générés et séparés par la tension qui apparaît sur la jonction ; ces porteurs qui se déplacent en sens opposés constituent le courant électrique.

On fabrique des cellules de trois types. Les cellules à homojonctions où la jonction *p-n* est obtenue par dopage du silicium. Par un processus de diffusion des impuretés de dopage on crée une couche mince (0,3 μm) de type *n* et une couche relativement épaisse (300 μm) de type *p*. Les cellules à hétérojonctions se composent de deux semiconducteurs différents. On dépose sur un support métallique, par vaporisation sous vide, une couche de sulfure de cadmium de type *n* d'une épaisseur de 20 à 30 μm ; par un procédé chimique on crée sur la surface de cette couche une couche de sulfure de cuivre de type *p* de 0,5 μm d'épaisseur. Le troisième type de cellule photovoltaïque met en œuvre la différence de potentiel de contact qui apparaît entre l'arséniure de gallium et un métal lorsqu'ils sont séparés par une pellicule extramince (0,002 μm) de diélectrique.

Pour pouvoir utiliser au mieux l'énergie de tout le spectre solaire, on doit utiliser des semiconducteurs ayant une largeur de bande interdite proche de 1,5 eV. En principe on peut obtenir un rendement de 28 %.

Les cellules à homojonction en silicium, qui présentent de nombreux avantages et ont fait l'objet d'études détaillées, ont un rendement de 11 à 15 %. On fabrique des photopiles en silicium depuis près de vingt ans. La matière première pour la fabrication du silicium est le sable (oxyde de silicium). Après purification du silicium on en fait des monocristaux que l'on découpe en plaquettes circulaires de 0,3 mm d'épaisseur. Depuis quelque temps on a mis au point un procédé de cristallisation par tirage de bandes de silicium monocristallin. La technologie du dopage du silicium par des impuretés, qui sert à produire dans les plaquettes une région de type *p*, est

Fig. 6.5



bien au point. Afin de réduire au minimum la réflexion des rayons solaires par le silicium, on recouvre la surface des plaquettes d'une mince pellicule d'oxyde de titane. Pour une intensité lumineuse égale à 100 MW/cm^2, un élément crée une tension de 0,6 V. La densité du courant de court-circuit est égale à 34 mA/cm^2. On peut assembler les cellules en batteries de différentes façons. On fabrique en série des plaquettes de silicium monocristallin d'un diamètre compris entre 5 et 7,5 cm. On dipose les plaquettes entre des lames de verre. En les connectant de façon convenable, on obtient une source de courant assez puissante.

Mais on peut concevoir un processus technologique permettant de fabriquer des cellules d'aire beaucoup plus grande.

Le principal obstacle à une exploitation à l'échelle industrielle des photopiles est leur prix élevé, qui est lié au prix de revient élevé du silicium monocristallin de bonne qualité.

On espère beaucoup de la technologie fondée sur l'utilisation de couches minces de silicium polycristallin. Les photopiles fabriquées selon cette technologie coûteront beaucoup moins cher, mais leur rendement sera notablement plus petit. Des études concernant l'élaboration de nouvelles technologies de fabrication de photopiles solaires de faible prix de revient sont en cours.

Parallèlement on étudie les procédés qui permettraient d'accroître la quantité d'énergie solaire tombant sur les cellules photovoltaïques.

On a élaboré des projets de centrales électriques comportant jusqu'à 34 000 miroirs servant à réfléchir les rayons solaires et à les envoyer sur un récepteur disposé au sommet d'une tour de 300 m de hauteur.

Lorsqu'on utilise le procédé de concentration de l'énergie solaire, il faut veiller à ce que le rendement des cellules ne soit pas affecté par l'élévation de la température des cellules. A ce point de vue les cellules en arséniure de gallium sont particulièrement avantageuses.

Sont à l'étude différents projets d'aménagement des centrales électriques solaires en haute montagne où les conditions d'éclairement sont excellentes. On dispose aussi d'un projet de centrales électriques installées à bord de vaisseaux spatiaux.

De telles centrales cosmiques pourraient capter l'énergie solaire sans aucune perte et l'enverraient sur Terre sous forme d'ondes électromagnétiques ultracourtes qui seraient reconverties sur Terre en énergie électrique. Cela ressemble à un projet de science-fiction, mais les ingénieurs

envisagent très sérieusement l'élaboration d'un projet de centrale électrique à photopiles d'une aire égale à 25 × 5 km² où on pourrait répartir 14 milliards de cellules photovoltaïques! La masse totale de la centrale serait de 100 000 t et cette centrale pourrait produire autant d'énergie qu'une bonne dizaine de centrales nucléaires de grande puissance, i.e. de l'ordre de 10 000 MW.

Ces différents projets sont élaborés dans les moindres détails et on a déjà commencé les études expérimentales sur modèles réduits.

L'édition précédente de ce livre a paru il y a trois ans seulement, mais au cours de ce court laps de temps on a pu observer une intensification des recherches sur les sources d'énergie non traditionnelles qui ne « pilleraient » pas la Terre et ne la pollueraient pas.

Pour terminer ce chapitre, donnons une citation tirée d'un reportage soviétique consacré aux différentes sources « non standards » d'énergie exposées au Japon (Littératournaïa Gazeta du 29 juillet 1981):

« ... Un pavillon rappelant par sa forme une pyramide égyptienne dont les murs sont formés de blocs en verre enchâssés dans de brillants châssis métalliques. Le pavillon est composé de 800 collecteurs de rayons solaires. Chaque collecteur a les dimensions suivantes: longueur 1820 mm, largeur 860 mm et épaisseur 105 mm. Grâce à ces collecteurs le pavillon d'une superficie de 4000 m² et de la hauteur d'une maison à 4 étages, pouvait être chauffé par les rayons solaires pendant les mois de mars et d'avril plutôt froids, qui maintenant, au début de l'été, assuraient la réfrigération des salles et produisaient 19 kilogrammes de glace alimentaire par jour, que l'on utilisait sur place pour le refroidissement des boissons.

Le pavillon voisin, d'un aspect tout aussi fantastique, est tout aussi fonctionnel que le précédent. Les collecteurs de rayons solaires, au lieu d'être des récipients remplis d'eau, sont des récipients étanches évacués, au nombre de 3000 ...

Dans l'un des pavillons « solaires » de l'exposition se trouve un miroir sphérique, éclairé par un puissant projecteur simulant le Soleil. La chaleur collectée par le miroir après plusieurs étapes de conversion sert à actionner un tout petit moteur électrique. Dans un proche avenir on commencera l'aménagement de centrales électriques solaires et aujourd'hui on cherche à choisir le type de centrale le plus économique.

Dans la banlieue de la ville de Nio, dans l'île Shikoku, on a construit une tour de 69 m de haut, au sommet de laquelle est installé un collecteur de rayons solaires et au pied de cette tour se trouve un générateur de courant électrique. A côté de cette tour se trouve un système différent, formé de plusieurs rangées de miroirs paraboliques servant à focaliser les rayons solaires. L'énergie collectée par ces miroirs est envoyée vers un générateur. A la fin de l'année on pourra choisir le système le plus rentable. »

ENERGIE ÉOLIENNE

Les masses d'air de l'atmosphère terrestre sont perpétuellement en mouvement ; les cyclones, tempêtes, vents alizés, brises sont autant de manifestations différentes de l'énergie du vent. Jadis on utilisait l'énergie éolienne pour faire voguer les navires à voile et pour actionner les moulins à vent. La puissance annuelle moyenne totale des mouvements de l'atmosphère terrestre représente 100 milliards de kW.

Les météorologues sont renseignés sur la vitesse des vents soufflant en différents points du globe et à différentes altitudes. Comme les vents sont très capricieux, dans les calculs d'estimation on prend pour base la vitesse de 4 m/s à une altitude de 90 m ; pour les régions côtières c'est une estimation fort modeste de la vitesse du vent.

Les sites les plus favorables pour l'utilisation de l'énergie éolienne sont situés sur le littoral. Les évaluations montrent que la Grande-Bretagne (de tous les pays européens, c'est le pays le plus riche en énergie éolienne) pourrait par temps calme tirer du vent une énergie six fois plus grande que celle que produisent actuellement toutes les centrales électriques du pays. En Irlande l'énergie éolienne est cent fois plus grande que la consommation d'énergie électrique du pays (il se peut aussi qu'il s'agit non pas d'un excédent de vent que d'un manque de centrales électriques dans ce pays).

Il y a vingt ans seulement personne n'aurait compté sur le vent pour produire de l'énergie, mais les tendances de l'énergétique moderne se modifient très rapidement. Des commissions sont nées un peu partout pour se concerter sur l'utilisation des sources d'énergie gratuite existant sur Terre. Les richesses du sous-sol font l'objet de sollicitude et l'humanité s'est mise à réfléchir à leur utilisation rationnelle. C'est pour cela que l'énergie éolienne fait maintenant l'objet d'études sérieuses. Compte tenu des possibilités réelles, on peut compter utiliser quelques fractions de pour cent des 100 milliards de kW disponibles, et c'est loin d'être négligeable.

Il existe des projets de « moulins » gigantesques. L'envergure des ailes dépasserait 100 mètres, la hauteur de la tour serait du même ordre,

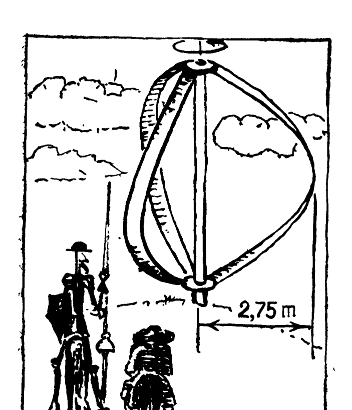


Fig. 6.6

la vitesse de l'extrémité des ailes atteindrait 500 km/h. Par temps ordinaire la puissance que fournirait ce moulin serait de 1 à 3 MW. Plusieurs milliers de moulins de cette taille, disséminés dans un pays où les vents forts sont fréquents, pourraient lui fournir toute l'énergie nécessaire. En 1973, l'Europe occidentale a produit 1261,6 milliards de kWh d'énergie électrique. En principe (si on ne lésine pas sur les dépenses d'installation) ce n'est qu'une petite partie de l'énergie que pourrait fournir le vent. La construction de très grandes éoliennes a déjà commencé.

Les calculs montrent qu'un moteur éolien fournit le maximum d'énergie lorsque son rotor réduit la vitesse du vent d'un tiers. Il ne faut pas s'imaginer qu'une éolienne est la copie modernisée d'un moulin à vent ; on peut fort bien utiliser des rotors à arbre vertical. Le rotor schématisé sur la figure 6.6 pour développer une puissance de l'ordre de 20 kW ; il présente l'avan-

tage de ne pas dépendre de la direction du vent, et son défaut est qu'il ne fonctionne que si la force du vent est importante. Le diamètre des rotors de ce type est égal à 5,5 m.

Quoique les générateurs éoliens n'occupent qu'une petite superficie, ils doivent se trouver les uns des autres à une distance telle qu'ils n'interagissent pas. Pour aménager une centrale électrique d'une puissance de 1000 MW, on doit disposer d'une superficie de l'ordre de 5 à 10 km^2.

CHAPITRE 7

PHYSIQUE DE L'UNIVERS

MESURE DES DISTANCES JUSQU'AUX ÉTOILES

De nos jours il est presque impossible de tracer une frontière entre l'astronomie et la physique. Tant que les astronomes se contentaient, à l'instar des géographes, de dresser des cartes du ciel, l'astronomie n'avait que peu d'attrait pour les physiciens. Au cours de ces dernières décennies, la situation changea radicalement, surtout après que les observations astronomiques purent être faites à partir de vaisseaux spatiaux et de la Lune.

Lorsque l'atmosphère terrestre ne cause pas d'empêchement, on arrive à capter les signaux qui nous parviennent des quatre coins de l'Univers. Parmi ces signaux, on trouve des flux de particules et des rayonnements électromagnétiques couvrant pratiquement la totalité du spectre depuis les ondes radio jusqu'aux rayons gamma. Les possibilités d'observation du ciel étoilé en lumière visible se sont énormément améliorées au cours de ces décennies.

Les études des flux de particules et du spectre électromagnétique sont indubitablement du ressort de la Physique. D'autre part l'étude de l'espace cosmique nous met en présence de différents phénomènes qu'on n'arrive pas à interpréter de façon univoque et on doit s'attendre à ce que l'étude de la Physique de l'Univers conduise à la découverte de nouvelles lois de la Nature. C'est pour ces différentes raisons que les études stellaires sont aujourd'hui l'apanage des physiciens de formation et de mentalité.

Commençons notre tour d'horizon de la Physique de l'Univers par un problème classique d'Astronomie. Comment faire pour mesurer la distance de la Terre à un corps céleste ? Actuellement on mesure la distance de la Terre au Soleil et aux planètes de façon très précise par le radar. La distance moyenne jusqu'au Soleil est égale à 149 597 800 ± 2000 km.

Or les astronomes arrivèrent à mesurer, bien avant que fut inventé le radar, la distance entre les planètes du système solaire ainsi que les distances jusqu'aux étoiles les plus proches (qui se trouvent à une distance jusqu'à 300 années de lumière de la Terre) à l'aide du procédé de triangulation qui paraît très simple.

Supposons qu'à assez grande distance de l'endroit où on se trouve, se dresse une haute tour, d'accès difficile. Pointons la lunette sur la tour et repérons cette direction. Déplaçons-nous de quelques kilomètres suivant une droite perpendiculaire à cette direction et faisons un nouveau pointage sur la tour. Il est clair que par rapport au paysage sur lequel se profile la tour, celle-ci sera vue sous un angle différent. L'angle formé par deux droites menées de la tour aux deux points d'observation est appelé parallaxe. La distance entre les deux points d'observation est la base. Dès que la parallaxe est mesurée et la base est connue, on construit un triangle rectangle et on trouve aussitôt la distance jusqu'à la tour. C'est cette méthode qu'utilisent les astronomes ; ils mesurent la parallaxe en observant l'astre à partir de deux observatoires se trouvant sur une même droite à une distance l'un de l'autre égale au rayon de la Terre. Au début les astronomes utilisaient certains dispositifs simples, plus tard des télescopes ; ils réussirent à mesurer les angles entre les droites passant par chacun des observa-

toires et chacun des astres (fig. 7.1). Ils remarquèrent qu'il existait des groupements d'étoiles qui se déplaçaient ensemble. Quels que soient les points d'observation les angles entre les directions de pointage restaient les mêmes. Mais parmi un ensemble d'étoiles on en décelait souvent une qui se déplaçait par rapport à toutes les autres. En prenant pour point de repère l'une des étoiles « fixes », on arrivait à mesurer le déplacement angulaire de l'étoile mobile par rapport à la constellation fixe. Ce déplacement angulaire s'interprète comme une parallaxe.

Déjà au XVIIe siècle, après que Galilée eut inventé le télescope, les astronomes mesurèrent les parallaxes des planètes en observant leurs déplacements par rapport à des étoiles « fixes ». On trouva alors que la Terre se trouvait à une distance de 140 millions de kilomètres du Soleil. Or c'est un résultat assez précis.

Lorsqu'on observe les étoiles à l'œil nu, il semble que leurs positions relatives soient toujours les mêmes. Mais si on photographie le ciel étoilé en différents points de la Terre, on peut déceler un déplacement des positions apparentes des étoiles. Si on prend deux photos d'une certaine région du ciel à partir d'un même observatoire à une demi-année d'intervalle, la distance entre les points de prise de vue sera égale à 300 millions de kilomètres.

Les radars ne conviennent pas à la mesure des distances aux étoiles et on les mesure conformément au principe du schéma de la figure 7.1.

Les photographies comme celles dont il a été question ci-dessus conduisent à conclure qu'il existe des étoiles qui se déplacent par rapport à d'autres. Comme il serait illogique d'admettre qu'il existerait des étoiles errantes et des étoiles fixes, on en conclut que les étoiles dont les posi-

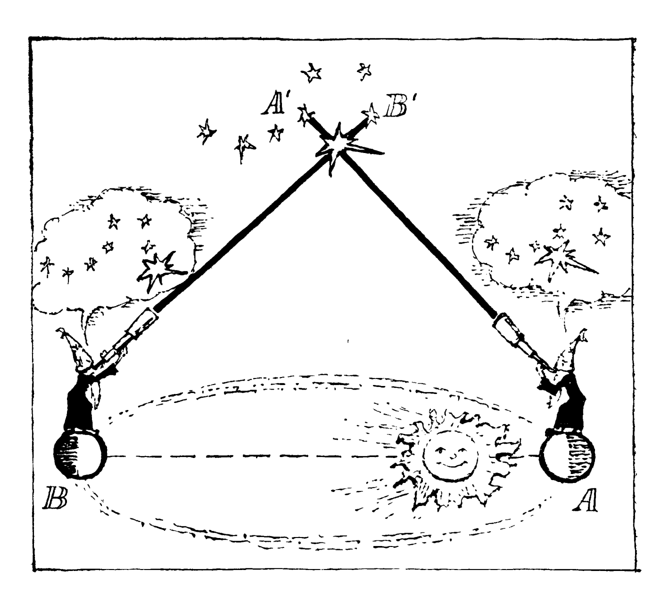


Fig. 7.1

tions relatives restent immuables se trouvent à des distances beaucoup plus grandes que les étoiles errantes. Quoi qu'il en soit, disposant d'instruments de précision, on peut mesurer aujourd'hui les parallaxes d'un grand nombre d'étoiles. Les mesures des parallaxes à un centième de seconde d'arc près ont été effectuées pour de nombreuses étoiles. On constate que les étoiles les plus proches se trouvent à des distances supérieures à 1 parsec.

Le parsec est une distance correspondant au déplacement angulaire par seconde si on prend pour base le rayon moyen de l'orbite terrestre. On trouve facilement qu'un parsec vaut 30,26 trillions de kilomètres.

Pour la mesure des distances, on utilise fréquemment les années de lumière. Une année de lumière est le chemin parcouru par la lumière en un an. Un parsec vaut 3,26 années de lumière.

La méthode de la parallaxe reste utilisable jusqu'aux distances de l'ordre de centaines d'années de lumière. Et comment faire pour mesurer les distances aux étoiles plus lointaines ? Ce n'est pas du tout simple et pour s'assurer que les évaluations sont correctes, il faut comparer les résultats de plusieurs mesures.

L'un des procédés utilisés à cette fin (il en existe beaucoup, mais on ne peut les envisager ici) est le suivant. Si on connaît la distance R de la Terre à l'étoile et sa magnitude apparente m (c'est une mesure de l'éclairement que l'étoile crée sur Terre), l'application de la loi selon laquelle l'éclairement varie en raison inverse du carré de la distance à la source, conduit à la formule suivante :

$$M = m - 5 \lg R + 5,$$

où M est la magnitude absolue d'une étoile. C'est la valeur qu'aurait une étoile si elle se trouvait à une distance standard de la Terre ; cette distance standard est égale à 10 parsecs.

Il y a d'excellentes raisons d'admettre que cette formule reste valable pour les étoiles lointaines. Reste à savoir comment l'utiliser pour déterminer la distance d'une étoile lointaine. Nous ne pouvons malheureusement pas décrire ce procédé car la place nous manque. Disons seulement que pour certaines catégories d'étoiles on arrive à tracer un graphique qui indique la variation du rapport des intensités de certaines paires de raies du spectre stellaire en fonction de la magnitude M. Les astronomes

savent très bien mesurer les intensités des raies spectrales.

On démontre que pour certaines étoiles dont l'éclat varie périodiquement (étoiles de la classe des céphéides) l'intensité énergétique, i. e. la valeur du flux lumineux contenu dans l'unité d'angle solide (rapportée à une région donnée du spectre ou au rayonnement total) augmente progressivement avec la période. L'intensité énergétique est rigoureusement liée à la magnitude *M*. La distance à la Terre de ces étoiles variables se laisse établir de façon précise.

Mentionnons une idée qui pourrait servir à mesurer « l'étendue » de l'Univers.

Les étoiles ne sont pas réparties dans l'Univers de façon désordonnée. A des distances inconcevables de la Terre se trouvent différentes constellations qui se déplacent par rapport au système solaire de façons très différentes. Ces déplacements permettent de déterminer à quelles distances se trouvent les constellations. Ces mesures se fondent sur l'effet Doppler.

Les formules qui ont été données dans le livre 3 s'appliquent à toutes les vibrations. Il s'ensuit que par mesure des fréquences des raies spectrales que l'on trouve dans le spectre de l'étoile, on peut déterminer la vitesse d'une étoile se déplaçant vers la Terre ou s'en éloignant. Comme dans la formule

$$\nu' = \nu\left(1 \pm \frac{v}{c}\right)$$

c représente la vitesse de la lumière, $c = 300\,000$ km/s, on conçoit que la vitesse de déplacement de l'étoile doit être suffisamment grande et le spectrographe doit être de très bonne qualité pour pouvoir déceler le déplacement des raies spectrales.

Le lecteur voudra bien noter que les savants sont absolument certains que l'hydrogène contenu dans les profondeurs des étoiles et que l'on décèle dans une étoile située à une distance inimaginable, est exactement le même hydrogène que celui qui se trouve sur Terre. Si l'étoile était au repos, le spectre de l'hydrogène serait exactement le même que celui que l'on relève dans un tube à décharge (cela témoigne de ce que le physicien est certain de l'unicité de l'Univers!). On constate que les raies sont décalées par rapport à leurs positions normales; on en déduit que les galaxies se meuvent avec une vitesse de plusieurs centaines ou même de plusieurs dizaines de milliers de kilomètres par seconde. Personne ne met en doute ces résultats, car le spectre de l'hydrogène se compose d'un très grand nombre de raies et on constate que toutes les raies sont décalées de la distance prévue par la formule de Doppler.

Reprenons maintenant la question de la mesure des distances aux étoiles. A quoi peut nous servir de connaître la vitesse de déplacement des étoiles? C'est bien simple... à condition, bien sûr, qu'on ait décelé au bout d'un an un déplacement d'une étoile donnée (déplacement que l'on repère toujours par rapport à d'autres étoiles que l'on peut considérer comme fixes). Si le déplacement angulaire φ de l'étoile est connu (ce déplacement est perpendiculaire au rayon lumineux que nous envoie l'étoile) et si on connaît la vitesse tangentielle, la distance R qui nous sépare de l'étoile est donnée par la formule

$$\frac{R\varphi}{t} = v.$$

On remplace *t* par le temps que mit l'étoile pour exécuter un déplacement angulaire donné.

Mais le lecteur peut rétorquer que dans la formule figure la vitesse tangentielle et on ne connaît pas la direction dans laquelle se déplace l'étoile. C'est une objection parfaitement juste et c'est pour cela que l'on procède comme suit. On choisit parmi toutes les étoiles celles qui présentent la même période de variation de la luminosité et on mesure pour ces étoiles la vitesse radiale. La vitesse radiale peut avoir toutes les valeurs comprises entre zéro (l'étoile se déplace perpendiculairement au rayon) et un maximum (l'étoile se déplace suivant le rayon). En posant qu'en moyenne les vitesses tangentielles et radiales sont égales, on portera dans la formule ci-dessus la valeur moyenne de toutes les vitesses mesurées

UNIVERS EN EXPANSION

Disposant des résultats de la mesure des distances, on peut décrire le monde des étoiles de la façon suivante. L'Univers observable est divisé en un nombre énorme d'amas d'étoiles que l'on appelle galaxies. Notre système solaire fait partie de la Galaxie que chacun de nous voit dans le ciel; c'est la voie lactée. Notre Galaxie se présente sous la forme d'un disque d'un diamètre voisin de 100 mille années de lumière. Elle contient près 10^{11} étoiles de différents types. Le Soleil qui est l'une de ces étoiles se trouve à la périphérie de notre Galaxie. Les étoiles se trouvent à très grandes distances les unes des autres; ces distances sont en moyenne 10 millions de fois plus grandes que la dimension d'une étoile. Pour obtenir la même raréfaction

dans l'atmosphère, on devrait réduire la densité de l'air de 10^{18} fois.

En ce qui concerne les positions relatives des galaxies, la situation est toute autre. Les distances moyennes entre galaxies voisines ne sont que plusieurs fois supérieures à leurs dimensions propres.

Les astrophysiciens sont en mesure de donner de nombreux détails sur le caractère des mouvements relatifs des étoiles appartenant à une même galaxie, mais on n'en parlera pas ici. Néanmoins même dans un livre de vulgarisation des notions de physique, on se doit de signaler un résultat de la plus haute importance. Par étude de l'effet Doppler dans les spectres des étoiles appartenant à des galaxies différentes, on est arrivé à conclure avec la plus parfaite certitude que les galaxies s'éloignent « de nous ». On a démontré que la vitesse avec laquelle s'éloigne la galaxie est proportionnelle à sa distance « de nous ». Les galaxies les plus lointaines se déplacent à des vitesses égales à près de la moitié de la vitesse de la lumière.

Pourquoi les mots « de nous » sont-ils mis entre guillemets? Mais parce qu'ils ont une signification qui est sûrement absurde. Pour s'imaginer que les galaxies s'éloignent « de nous », il faut croire que Dieu le père a créé la Terre et a disposé les étoiles tout autour d'elle. Cette conception fut élaborée par Aristote et subsista pendant tout le Moyen Age. L'Univers avait des frontières au-delà desquelles se trouvait le royaume de Dieu (empyrée).

Pour l'homme moderne l'idée d'un Univers limité est inacceptable. S'il existe une frontière, on se demande aussitôt ce qu'il y a au-delà. Il faut donc éviter de parler des frontières de l'Univers. D'autre part il n'y a absolument aucune

raison de penser que la Terre ou le Soleil sont des corps privilégiés de l'Univers, car cela est contredit par toutes les données de l'Astrophysique. Mais que signifie alors que les galaxies s'éloignent « de nous »? Comment concilier ce résultat avec les conditions auxquelles doit satisfaire tout modèle de l'Univers? On ne conçoit pas que l'Univers puisse avoir des limites, on exige qu'il soit plus ou moins homogène et on voudrait que les habitants de n'importe quelle étoile aient tous la même conception de l'Univers.

La nécessité intellectuelle de l'existence d'un tel modèle de l'Univers amena Einstein à conclure que la géométrie euclidienne que nous utilisons dans la vie courante cesse d'être valable lorsqu'on a affaire aux dimensions inconcevables du monde stellaire. Le rejet de la géométrie euclidienne signifie qu'on doit rejeter toute possibilité d'élaborer un modèle concret de l'Univers. Ce ne sera pas la première fois qu'on doit abandonner l'espoir de se faire une idée concrète du monde dans lequel nous vivons.

Après avoir rejeté la géométrie euclidienne, on peut suggérer un modèle de l'Univers qui est tout à la fois fermé et ne possède ni frontières, ni centre. Dans ce modèle tous les points de l'espace sont équivalents.

Il peut sembler à première vue qu'Einstein nous impose de consentir un très grand sacrifice. Tout le monde est habitué à l'idée que deux lignes parallèles ne se coupent jamais et que la somme des carrés des côtés d'un triangle rectangle est égale au carré de l'hypothénuse. Habitude? Mais rappelons-nous les leçons de géographie. Sur un globe terrestre, les lignes des latitudes sont parallèles; et qu'en est-il sur une carte géographique plane? On doit alors préciser de

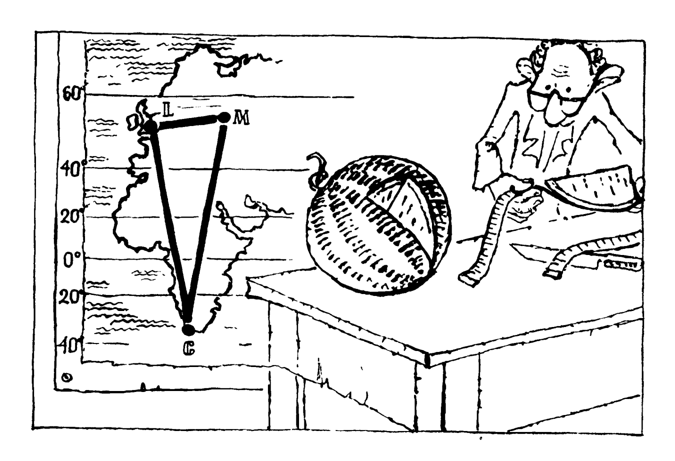


Fig. 7.2

quelle carte il s'agit, car on peut dresser les cartes géographiques de plusieurs façons différentes. Si on représente le globe terrestre sous forme de deux hémisphères, les parallèles ne seront plus parallèles les unes aux autres. Et si on utilise la méthode de la projection orthogonale, les intervalles entre les parallèles ne sont plus constants. Et que devient dans tout cela la géométrie d'Euclide ?

Le lecteur peut se rendre compte par lui-même que la géométrie euclidienne est en défaut. Sur la figure 7.2, qui représente la carte des lignes aériennes les plus importantes on a tracé le triangle Moscou — Le Cap — Londres. Le choix de ce triangle tient uniquement à ce que, par un heureux hasard, c'est un triangle rectangle sur la carte utilisée. Il s'ensuit que la somme des carrés des côtés du triangle doit être égale au carré de l'hypothénuse. La distance de Moscou à Londres est de 2490 km, de Moscou au Cap

de 10 130 km et de Londres au Cap de 9660 km. Le calcul montre que ni le théorème, ni la géométrie euclidienne ne valent rien sur une carte géographique. Lorsqu'on représente le globe terrestre sur un plan, les lois de la géométrie diffèrent des lois « usuelles ».

Lorsqu'on examine la carte géographique des hémisphères, on en voit les bords. Mais il n'y a pas de bords, puisqu'en se déplaçant à la surface du globe, on n'arrive jamais au « bord de la Terre ».

On raconte l'anecdote suivante. Le fils d'Einstein demanda un jour à son père : « Pourquoi es-tu si célèbre ? » « C'est parce que j'ai eu la chance d'être le premier à remarquer qu'un scarabée qui se promène sur une mappemonde peut la contourner en suivant l'équateur et revenir à son point de départ ». Il est bien évident qu'un tel énoncé ne comporte aucune découverte, mais si on le transpose à l'espace tridimensionnel de l'Univers, on voit qu'il fallait être Einstein pour en tirer des conclusions extrêmement hardies : l'Univers est fini et il est fermé tout comme la surface bidimensionnelle qui délimite le globe ; tous les points de l'Univers sont tout aussi équivalents que le sont les différents points de la surface d'une mappemonde.

On peut en tirer la conclusion suivante. Si nous, les Terriens, observons que toutes les galaxies s'éloignent de nous, les habitants des planètes de n'importe quelle étoile arriverons au même résultat. Ils tireront les mêmes conclusions que nous en ce qui concerne le caractère du mouvement du monde stellaire et leurs mesures donneront les mêmes vitesses de déplacement des galaxies que celles que nous aurons déterminées.

Le modèle de l'Univers proposé par Einstein en 1917 est une conséquence directe de la théorie de la relativité générale dont il est l'auteur (la partie de la théorie de la relativité qui a été exposée au chapitre 4 est appelée relativité restreinte).

Einstein n'envisagea cependant pas la possibilité de ce qu'un Univers fermé puisse changer de dimensions. Ce fut l'œuvre du physicien soviétique Alexandre Friedman (1888-1925). La théorie implique que l'Univers soit constamment en expansion ou qu'il subisse une succession d'expansions et de contractions alternées; la théorie n'admet pas que l'Univers soit statique. Nous pouvons adopter l'alternative qui nous convient, i. e. admettre que nous vivons à une époque d'expansion de l'Univers, faisant suite à des époques de contractions et d'expansions, ou bien il faut admettre qu'il fut un temps (le calcul montre qu'il s'agit d'une époque qui date de plusieurs dizaines de milliards d'années) où l'Univers se présentait comme un « œuf cosmique » qui éclata et depuis ne cesse de s'étendre.

Il faut bien noter que la variante de l'explosion initiale (« big bang ») n'a rien à voir avec le concept de création du monde. Il n'est pas exclu que nos tentatives d'imaginer ce qui a pu se passer il y a très longtemps ou ce qui se passera dans un délai très long, ou encore ce qui se passe à très grande distance de nous, sont injustifiées dans le cadre des théories existantes.

En restant dans le cadre de conceptions schématiques raisonnables, on peut envisager un exemple simple. Mesurons le déplacement rouge des raies spectrales d'un rayonnement qui nous parvient des galaxies lointaines. A l'aide de la formule de Doppler on évalue la vitesse de fuite des Galaxies. Plus la galaxie est lointaine, plus

sa vitesse est grande. Le télescope permet de trouver les vitesses de fuite de galaxies de plus en plus lointaines — dix mille kilomètres par seconde, cent mille kilomètres par seconde, etc. Mais il doit exister une limite à ces vitesses de fuite. En effet, si une galaxie s'éloigne de nous avec la vitesse de la lumière, nous ne pouvons la déceler par principe, puisque la fréquence de la lumière que fournit alors la formule de Doppler est égale ... à zéro. La lumière envoyée par une telle galaxie ne pourrait parvenir jusqu'à nous.

Quelles pourraient être les plus grandes distances mesurables à l'aide d'instruments superprécis? Il est bien évident qu'une telle estimation ne peut être que très approximative; on ne pourra cependant pas regretter de ne pas voir assez loin, puisque le résultat auquel on parvient se chiffre par milliards d'années de lumière!

Il serait dénué de sens d'envisager des distances encore plus grandes. Dans le cadre des conceptions modernes, il est illusoire de vouloir envisager des distances dépassant plusieurs milliards d'années de lumière puisqu'on ne peut suggérer une méthode de mesure de telles distances.

On retrouve une situation analogue à celle qui concerne la trajectoire de l'électron: on ne peut la mesurer pour la bonne raison qu'on ne peut la concevoir.

THÉORIE DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALISÉE

La théorie de la relativité restreinte imposa d'apporter des corrections aux lois de la mécanique dans le cas de corps animés de vitesses proches de la vitesse de la lumière. La théorie

de la relativité généralisée introduit des corrections à la conception usuelle de l'espace lorsqu'il s'agit de distances extrêmement grandes. C'est pour cela qu'il convient de parler de cette théorie dans le chapitre consacré à la physique de l'Univers.

La théorie de la relativité généralisée se fonde sur le principe suivant : il n'existe aucune expérience qui permettrait de distinguer le mouvement d'un corps déterminé par l'action du champ de la pesanteur du mouvement rapporté à un référentiel non inertiel convenable.

Examinons quelques exemples simples. Supposons qu'on se trouve dans un ascenseur qui tombe avec une accélération a. Laissons tomber une bille et essayons de se faire une idée du caractère de sa chute. Dès que la bille s'échappe de la main, du point de vue d'un observateur placé dans un référentiel à inertie, elle commence une chute libre avec une accélération g. Comme l'ascenseur tombe avec une accélération a, l'accélération de la bille par rapport au sol de l'ascenseur est égale à $(g - a)$. Un observateur qui se trouverait dans l'ascenseur pourra décrire la chute de la bille ou de tout autre corps par l'accélération $g' = g - a$. Autrement dit, l'observateur se trouvant dans l'ascenseur n'aura pas besoin de savoir que l'ascenseur est animé d'un mouvement accéléré, car il n'aura qu'à modifier l'accélération du champ de pesanteur dans son propre référentiel.

Comparons maintenant deux ascenseurs : l'un suspendu à demeure au-dessus de la Terre et l'autre en mouvement dans le vide interplanétaire avec une accélération a par rapport aux étoiles. Tous les corps se trouvant dans l'ascenseur immobilisé au-dessus de la Terre jouissent de la faculté de tomber en chute libre avec l'ac-

célération g. Les corps se trouvant dans l'ascenseur interplanétaire jouissent de la même faculté et « tomberont » sur le sol de l'ascenseur avec une accélération $-a$.

Il s'ensuit que l'action du champ de la pesanteur et celle d'un mouvement accéléré sont indiscernables.

Le comportement d'un corps se trouvant dans un système de coordonnées animé d'un mouvement accéléré est équivalent à celui d'un corps soumis à un champ de pesanteur équivalent. Cette équivalence peut être totale si les observations sont effectuées dans une portion réduite de l'espace. Imaginons en effet un ascenseur dont le fond a des dimensions linéaires de plusieurs milliers de kilomètres. Si cet ascenseur est immobilisé au-dessus de la surface terrestre, les phénomènes y évolueront autrement que dans le cas où l'ascenseur serait en mouvement avec une accélération a par rapport à des étoiles fixes. La figure 7.3 illustre cette différence ; dans le premier cas les corps tombent en chute libre sur le fond de l'appareil suivant des directions obliques et dans le second, ils tombent suivant la verticale.

Ainsi, le principe de l'équivalence est valable dans des régions de l'espace où le champ de pesanteur est uniforme.

Le principe de l'équivalence entre le champ de gravitation et un système de référence local de caractéristiques convenables conduit à une conclusion importante : l'existence du champ de gravitation est liée à la courbure de l'espace et à une distorsion de la marche du temps.

Soient deux observateurs occupés à mesurer les distances et les intervalles de temps ; l'objet de leurs études sont les événements qui se passent sur un disque en rotation. Un des observa-

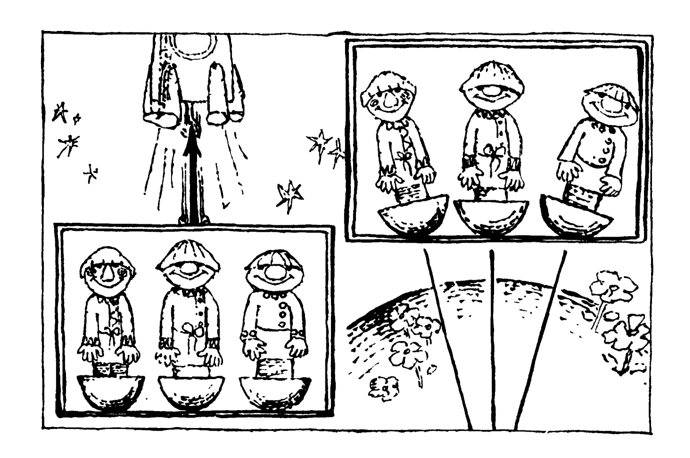


Fig. 7.3

teurs s'est installé sur le disque, tandis que l'autre est au repos (occupe une position fixe par rapport aux étoiles). L'observateur qui est sur le disque est le seul à travailler, car son collègue au repos ne fait qu'observer ses faits et gestes.

La première expérience consiste à mesurer des distances radiales, i. e. les distances entre deux objets disposés suivant un seul et même rayon du disque à des distances différentes du centre du disque. La mesure se fait de façon habituelle, i. e. on superpose autant de fois qu'il le faut une règle graduée standard au segment de droite compris entre les objets. Les deux observateurs trouvent que la règle disposée perpendiculairement à la direction du mouvement a exactement la même longueur. Ils seront donc d'accord sur la longueur du segment de droite radial.

L'observateur se trouvant sur le disque se prépare maintenant à réaliser une deuxième expérience. Il se propose de mesurer la longueur d'une circonférence, et pour ce faire il devra disposer sa règle dans le sens du mouvement du disque. Il devra évidemment tenir compte de la courbure de la circonférence et utiliser une règle graduée assez courte pour pouvoir confondre la longueur d'un segment de tangente avec la longueur de l'arc. Les deux observateurs ne discuteront pas du nombre de fois qu'il fallut appliquer la règle pour faire le tour de la circonférence, mais ils ne seront pas d'accord en ce qui concerne la longueur de la circonférence. L'observateur au repos estime que la règle a subi une contraction puisqu'elle est disposée suivant la direction du déplacement.

Ainsi les observateurs sont d'accord sur la longueur du rayon de la circonférence, mais sont en désaccord sur sa longueur. L'observateur au repos en arrive à conclure que la formule $2\pi r$ donnant la longueur de la circonférence est en défaut et affirmera que pour lui la longueur de la circonférence est inférieure à $2\pi r$.

Cet exemple montre de quelle façon la théorie de la relativité en arrive à répudier la géométrie euclidienne, ou ce qui revient au même introduit le concept de la courbure de l'espace.

Des « troubles » analogues affectèrent les horloges des deux observateurs. Les horloges qui sont disposées à différentes distances de l'axe de rotation marchent à des vitesses différentes. Toutes ces horloges retardent sur l'horloge au repos et le retard est d'autant plus grand que l'horloge se trouve plus loin de l'axe de rotation. L'observateur au repos dira qu'un habitant du disque ne devrait utiliser des horloges et des règles que s'il se trouve à une distance donnée

du centre du disque. L espace et le temps présentent donc des particularités locales.

Appliquons maintenant le principe de l'équivalence. Puisque l'espace et le temps présentent des particularités locales sur un disque en rotation, il en sera de même dans le champ de gravitation. Le cas du disque est analogue à celui de l'ascenseur illustré par la figure 7.3. Un mouvement accéléré est indiscernable du mouvement dans un champ de gravitation orienté dans le sens opposé au sens de l'accélération.

Il s'ensuit que la courbure locale de l'espace et du temps est équivalente à l'existence d'un champ de gravitation.

Le fait que l'Univers soit fermé (voir paragraphe précédent) constitue une preuve de la justesse de la théorie de la relativité généralisée. On doit noter cependant que l'hypothèse de l'Univers fermé n'est pas la seule possible.

Par un raisonnement mathématique rigoureux on arrive à déduire des équations compliquées de la théorie généralisée plusieurs résultats quantitatifs. Einstein montra d'abord que lorsque les rayons lumineux passent à proximité du Soleil, ils doivent subir une déviation. Un rayon lumineux passant à proximité immédiate du Soleil subit une déviation égale à 1,75″. Les mesures directes ont fourni la valeur 1,70″. Il montra ensuite que l'orbite de la planète Mercure (plus exactement son périhélie) doit tourner dans son plan. Le calcul montre que le déplacement angulaire doit représenter 43″ par siècle. Les observations ont confirmé ce résultat de la théorie. Une troisième prévision théorique, qui a été confirmée par l'expérience, affirme qu'un photon perd de l'énergie (sa fréquence change donc) lorsqu'il doit surmonter l'action d'un champ de gravitation.

La théorie de la relativité généralisée est l'un des plus haut sommets de la pensée humaine et son élaboration joua un rôle de premier plan dans le développement des conceptions concernant l'Univers et révolutionna la Physique.

ÂGE DES ÉTOILES

La physique de l'Univers est en plein essor et on ne peut la considérer comme un domaine scientifique complètement achevé, comme c'est le cas de la mécanique des petites vitesses ou de la thermodynamique. Il n'est donc pas exclu que l'étude des étoiles permette de découvrir de nouvelles lois de la Nature, quoiqu'on n'en ait trouvé aucune jusqu'à présent. Quoiqu'il en soit, l'image de l'Univers qu'esquissent de temps en temps différents physiciens dans des ouvrages de vulgarisation évolue constamment. Ce qui suit devra peut-être subir une révision d'ici une ou deux décennies.

Les astronomes se doutaient depuis longtemps que les étoiles étaient différentes. A l'aide du télescope, du spectrographe et de l'interféromètre, on arriva à déterminer plusieurs grandeurs physiques caractérisant chacune des étoiles observées.

Par analogie avec les expériences réalisées sur Terre (cf. page 14), on peut poser que le caractère des spectres stellaires dépend de la température régnant à la surface de l'étoile. La couleur de l'étoile dépend univoquement de sa température. Lorsque la température à la surface de l'étoile est de 3000 à 4000 K l'étoile a une couleur rougeâtre ; si elle atteint 6000 à 7000 K, elle a une couleur jaunâtre. Les étoiles bleu pâle ont à la surface une température de 10 000 à 12 000 K. Lorsque les physiciens pénétrèrent dans l'espace

cosmique, ils décelèrent des étoiles pour lesquelles le maximum de rayonnement se situe dans la gamme des rayons X ou même des rayons gamma. Cela signifie que la température de ces étoiles peut atteindre plusieurs millions de kelvins.

Une autre caractéristique importante des étoiles est l'énergie spectrale totale qu'elles envoient sur Terre. Cette caractéristique est la luminosité des étoiles. Les énormes différences de luminosité que l'on observe peuvent être déterminées par la dimension et la masse de l'étoile, par son éloignement et par sa température.

En ce qui concerne la composition chimique des étoiles, elles sont formées pour l'essentiel par des plasmas d'hydrogène-hélium. Le Soleil est une étoile assez typique et on connaît assez bien sa composition chimique d'après ses spectres d'émission, ainsi que d'après les calculs théoriques de l'énergie rayonnée. Le Soleil est composé pour 70 % d'hydrogène et pour 29 % d'hélium; la teneur en tous les autres éléments n'est que de 1 %.

On a décelé dans l'atmosphère de nombreuses étoiles la présence d'intenses champs magnétiques, des milliers de fois plus intenses que le champ magnétique terrestre. C'est encore l'analyse spectrale qui a permis de découvrir l'existence des champs magnétiques puisque ceux-ci déterminent l'éclatement des raies spectrales.

Le milieu interstellaire est raréfié à un point inimaginable: il contient un atome par cm^3 de milieu. Rappelons qu'un cm^3 d'air contient $2,7 \cdot 10^{19}$ molécules. Un atome par cm^3, ce n'est qu'une valeur moyenne, car il existe des régions de l'espace où la densité du gaz interstellaire est notablement supérieure à cette valeur moyen-

ne. Outre le gaz, l'espace interstellaire contient encore des poussières formées de particules de 10^{-4} à 10^{-5} cm de diamètre.

On doit admettre que les étoiles se forment à partir du milieu interstellaire composé de gaz et de poussières. Sous l'action des forces de gravitation un certain nuage commence à se contracter en forme de boule. Au bout de plusieurs centaines de millénaires ce nuage se contractera en étoile, avec une élévation de température suffisante pour la rendre visible sur la sphère céleste. Il est clair que cet intervalle de temps dépend fortement des dimensions et donc de la masse du nuage qui se contracte.

A mesure que la contraction se poursuit, la température dans les profondeurs de l'étoile augmente et atteint finalement une valeur où évoluent les réactions thermonucléaires. Quatre noyaux d'atomes d'hydrogène fusionnent pour donner un noyau de l'atome d'hélium. Rappelons qu'à la suite de cette réaction 4,0339 u. m. a. des quatre atomes d'hydrogène se transforment en 4,0038 u. m. a. de l'hélium et qu'ainsi la réaction dégage une quantité d'énergie équivalente à 0,0301 u. m. a.

La combustion d'hydrogène qui se produit au centre des étoiles dure pendant des intervalles de temps dépendant de leurs masses. Dans le cas du Soleil cet intervalle de temps est égal à 10-20 milliards d'années. C'est la période de l'état stable d'une étoile. Les forces d'attraction gravitationnelle sont équilibrées par la pression intérieure produite par des noyaux chauds, qui cherche à dilater l'étoile. On peut dire que l'étoile ressemble à un ballon rempli de gaz comprimé, mais le rôle des parois du ballon est assumé par les forces de gravitation.

Lorsque les réserves d'hydrogène combustible commenceront à s'épuiser, la pression intérieure commencera à baisser et le cœur de l'étoile commencera à se contracter.

On pose alors aux théoriciens la question suivante: qu'est-ce qui se passera ensuite? Se fondant sur leurs calculs, les théoriciens expliquent que la destinée ultérieure d'une étoile dépendra de son aptitude à se débarrasser de son enveloppe extérieure. Si elle arrive à le faire et si la masse de l'étoile devenait deux fois plus petite que celle du Soleil, des forces pouvant s'opposer aux forces gravitationnelles pourraient apparaître et on obtiendrait une petite étoile dont la surface serait portée à haute température. Ces étoiles sont appelées naines blanches.

Et qu'advient-il ensuite? Une nouvelle fois le sort de l'étoile dépendra de sa masse. Si la masse de la naine blanche est inférieure à la masse du Soleil multipliée par 1,5, l'étoile s'éteindra lentement sans qu'aucun événement dramatique vienne perturber le cours des choses. Son rayon et sa température iront en diminuant et finalement la naine se transforme en une étoile froide de la taille de la Terre. Telle est la fin de la majorité des étoiles.

Mais si la masse d'une naine blanche qui s'est formée après que l'étoile, qui a consommé tout son combustible, se sera débarrassée de son enveloppe, est supérieure à la masse du Soleil multipliée par 1,5 environ, la contraction se poursuivra. Les électrons fusionneront avec les protons et il se formera une étoile neutronique dont la dimension ne dépassera pas quelques dizaines de kilomètres. Selon les calculs, la température d'une étoile neutronique doit être de l'ordre d'une dizaine de millions de kelvins.

Le maximum de sa courbe spectrale de rayonnement se situe dans la gamme des rayons X.

C'est ce qui se passe si l'étoile se débarrasse de son enveloppe extérieure; or les équations mathématiques n'imposent nullement ce déshabillage. Si un corps céleste possède une masse égale à la masse du Soleil, l'attraction gravitationnelle détruira l'étoile et on trouvera à sa place un trou noir.

A quel stade de contraction doit disparaître l'étoile et pourquoi l'emplacement où elle se trouvait est appelé trou noir?

Rappelons les lois simples qui sont à la base du lancement des fusées cosmiques (voir livre 1). Pour quitter la Terre la fusée doit avoir une vitesse de 11 km/s. La valeur de cette vitesse se laisse déterminer par l'équation

$$v^2 = 2\gamma \frac{M}{R}.$$

Il s'ensuit de cette formule qu'au fur et à mesure de la contraction d'une sphère de masse déterminée, la vitesse que devrait avoir une fusée pour s'échapper de ce corps céleste dans le cosmos ne cessera de croître. Or la vitesse limite est égale à 300 000 km/s! Si une sphère stellaire de masse donnée se contractait jusqu'à la taille d'une boule de rayon

$$R = 2\gamma \frac{M}{(300\,000 \text{ km/s})^2}$$

aucun objet ne pourra plus s'en échapper. Autrement dit, à l'emplacement où se trouvait l'étoile tout ce que l'on veut peut pénétrer, y compris les rayons lumineux ou n'importe quel rayonnement électromagnétique, mais rien ne peut en sortir. On doit reconnaître que la dénomination « trou noir » est parfaitement adéquate.

A l'aide de la formule ci-dessus, on trouve facilement que les trous noirs ayant des masses comprises entre 3 et 50 masses solaires auront des dimensions comprises entre 60 et 1000 km.

Quelles recherches entreprend-on pour déceler les trous noirs? Le lecteur est en droit de penser que c'est là une question bien particulière qui ne devrait pas être abordée dans un petit livre prétendant couvrir toute la Physique. Or l'auteur estime que l'approche de cette question particulière est fort instructive au point de vue de la méthode de recherche. Le talent du savant se révèle lorsqu'il s'agit de trouver des preuves indirectes de la validité d'un modèle que l'on ne peut caractériser directement.

A première vue le problème qui se présente est extrêmement compliqué sinon insoluble. Aucun appareil, aussi perfectionné soit-il, ne peut discerner un petit grain noir de 1000 km de diamètre à une distance fantastique.

Le physicien soviétique Y. B. Zeldovitch suggéra, il y a plus de 20 ans, de procéder à la recherche des trous noirs en se fondant sur l'idée que leur présence doit affecter le comportement des corps célestes visibles se trouvant à proximité. Aidé de ses collaborateurs, il se mit à compulser les catalogues stellaires afin d'y trouver une étoile visible tournant autour d'un trou noir. Une étoile de ce type doit être solitaire et sa rotation doit être telle que ses raies spectrales se déplaceront périodiquement vers le rouge et vers le bleu suivant que l'étoile s'éloigne ou se rapproche de nous.

Des chercheurs d'autres pays se mirent de la partie et on trouva plusieurs étoiles qui paraissaient convenir. Connaissant le déplacement par effet Doppler, on peut évaluer *grosso modo* la masse de l'étoile autour de laquelle tourne le

satellite visible. On sélectionna ainsi plusieurs candidats invisibles dont les masses étaient trois fois plus grandes que la masse du Soleil. Il ne pouvait donc s'agir ni de naines blanches ni d'étoiles neutroniques.

Néanmoins les résultats obtenus sont insuffisants pour pouvoir affirmer qu'un système aussi inusuel que le trou noir existe effectivement. Les opposants pourraient avancer maintes explications du déplacement des raies par effet Doppler.

Il existe cependant un phénomène qui pourrait être mis à profit. Ce phénomène consiste en ce qu'un trou noir jouit de la faculté d'extraire les gaz contenus dans son satellite. En pénétrant dans le trou noir, ces gaz doivent s'échauffer très fortement et émettre des rayons X. Il est vrai que les naines blanches et les étoiles neutroniques jouissent de cette même faculté de s'attirer les gaz. Mais comme on l'a déjà indiqué, ces trois corps célestes se distinguent par leurs masses.

Récemment on trouva une étoile qui satisfait à toutes les conditions d'un satellite de trou noir. A la suite de cette découverte, on procédera à de nouvelles études expérimentales et théoriques afin de prédire les caractéristiques du spectre de rayons X émis par l'environnement du trou noir. Dans un proche avenir, on saura si ces « objets » extraordinaires se rencontrent fréquemment dans l'Univers. On a des raisons sérieuses pour estimer qu'il peut exister des trous noirs de grandes dimensions et des mini-trous noirs d'une masse de l'ordre de 10^{16} g. Ces trous noirs, plus petits qu'un noyau atomique, peuvent s'anéantir subitement en libérant l'énergie qui y était contenue. Cette quantité d'énergie est assez grande pour satis-

faire à tous les besoins de l'humanité pendant de nombreuses années. Voilà un excellent sujet de science-fiction!

RADIOASTRONOMIE

La figure 7.4 représente la photographie d'une antenne parabolique qui permet de rassembler en son foyer les rayons radioélectriques parallèles tombant sur l'antenne. Un récepteur spécial est disposé à l'emplacement du point de convergence des rayons; le signal est ensuite amplifié par les procédés de la radiotechnique. L'antenne parabolique représentée sur la figure 7.4 est installée près de la ville d'Effelsberg (R.F.A.). A l'aide de cette antenne de 100 m de diamètre, des savants de nombreux pays, y compris d'U.R.S.S., se livrent à des recherches communes.

Les antennes de ce type possèdent une sensibilité extraordinaire. En les tournant de façon que l'axe du miroir pointe dans la direction qui intéresse les chercheurs, on arrive à capter des flux d'énergie de l'ordre de 10^{-28} W·s/m². Convenons que c'est extraordinaire.

La radioastronomie permit de faire plusieurs découvertes fondamentales en Physique de l'Univers.

On a installé des radiotélescopes sur la Lune et sur plusieurs satellites artificiels, puisqu'alors l'absorption et la réflexion des ondes électromagnétiques par l'atmosphère ne gênent plus les observateurs. Jusqu'à ce jour on ne dispose que de deux « fenêtres » dans le spectre électromagnétique: l'une pour la lumière visible, l'autre pour le rayonnement radioélectrique dans la gamme des longueurs d'onde comprise entre 2 cm (15 000 MHz) et 30 m (10 MHz).

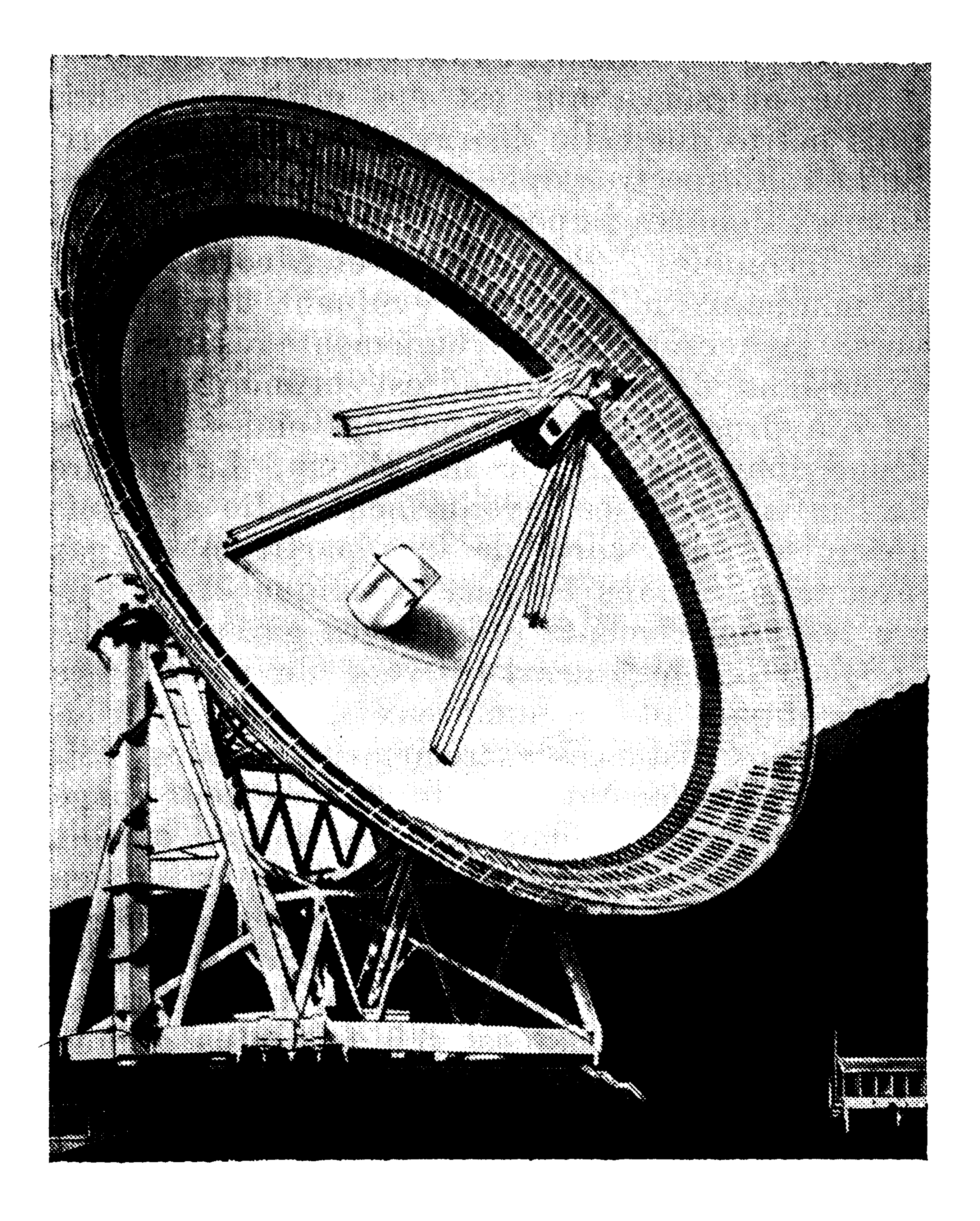


Fig. 7.4

L'état de l'atmosphère n'affecte pas les observations radioastronomiques. Le ciel « radio » est bien différent du ciel étoilé.

Les émissions radio du cosmos ne sont pas bien intenses et leur étude n'a été rendue possible que grâce aux surprenantes réalisations de la radiotechnique. Indiquons à titre d'exem-

pie que le rayonnement radioélectrique du Soleil a une puissance qui est des millions de fois plus petite que celle du rayonnement lumineux. Si la radiospectroscopie n'existait pas, de nombreuses données importantes nous seraient restées inconnues. Pour interpréter correctement de nombreux phénomènes évoluant dans l'Univers, la mesure du rayonnement résiduel des explosions du supernovae est primordiale.

L'hydrogène neutre émet des ondes intenses d'une longueur d'onde de 21 cm. La mesure de l'intensité de ce rayonnement radio a permis d'esquisser une carte de la répartition du gaz interstellaire dans l'espace cosmique et de suivre les déplacements des nuages gazeux.

On a décelé dans l'Univers de nombreuses radiogalaxies et de nombreux quasars se trouvant à des distances extrêmement grandes. Signalons simplement que le déplacement rouge des rayonnements émis par ces sources atteint la valeur 3,5. On définit le déplacement rouge comme le rapport de la différence des longueurs d'onde de l'onde captée et de l'onde émise à la longueur d'onde de l'onde émise. La différence des longueurs d'onde est 3,5 fois plus grande que la longueur d'onde des rayonnements émis.

RAYONS COSMIQUES

Les études que l'on peut effectuer aujourd'hui dans l'espace cosmique démontrent que la Terre est constamment bombardée par des flux de particules nucléaires animées de vitesses peu différentes de la vitesse de la lumière. Ces particules ont des énergies comprises entre 10^8 et 10^{20} eV. Une énergie de 10^{20} eV dépasse de 8 ordres de grandeur celle que l'on peut créer aujour-

d'hui dans les accélérateurs de particules les plus puissants.

Les rayons cosmiques primaires se composent surtout de protons (à 90 % environ) et de noyaux plus lourds. Lors des chocs des rayons cosmiques avec d'autres molécules, atomes et noyaux apparaissent des particules élémentaires de tous types. Les astrophysiciens ne s'intéressent, eux, qu'aux rayons cosmiques primaires, car ils cherchent à savoir comment se forment les flux des particules doués d'une énergie aussi grande et d'où proviennent ces particules.

On démontra depuis longtemps que le Soleil ne pouvait être la source des rayons cosmiques. On peut donc en inférer que les rayons cosmiques ne peuvent parvenir d'autres étoiles puisque toutes les étoiles sont semblables au Soleil. Quelle est donc l'origine des rayons cosmiques?

Dans notre Galaxie se trouve la Nébuleuse du Crabe qui s'est constituée en 1054 à la suite de l'explosion d'une étoile (rappelons que les savants observent le ciel depuis plusieurs millénaires). Les données expérimentales montrent que cette nébuleuse est une source de rayonnement radioélectrique et une source de rayons cosmiques. Cette coïncidence explique l'énorme énergie des protons cosmiques. Il suffit d'admettre pour cela que le champ électromagnétique qui s'est constitué à la suite de l'explosion d'une étoile fait fonction de synchrotron; les particules décrivent des trajectoires en hélice autour des lignes d'induction magnétique et comme ce mouvement dure des milliers d'années de lumière les particules acquièrent des énergies fantastiques.

Les calculs montrent qu'après avoir parcouru une distance égale à la dimension de notre Galaxie, une particule cosmique ne peut acquérir

une énergie supérieure à 10^{19} eV. On en conclut que les particules ayant une énergie plus grande proviennent d'autres Galaxies.

Il n'est nullement nécessaire de supposer que seule l'explosion d'une étoile peut entraîner la production de rayons cosmiques. Toutes les sources stellaires d'ondes radio peuvent être simultanément des sources des rayons cosmiques.

On a découvert les rayons cosmiques au début du XXe siècle en disposant des électroscopes à bord d'aérostats; on observa que les électroscopes se déchargeaient beaucoup plus rapidement aux hautes altitudes que lorsque cet instrument, qui a fait ses preuves, était disposé au niveau de la mer.

La chute des feuilles de l'électroscope qui se produisait régulièrement ne pouvait être imputée à un défaut des instruments et devait être provoquée par des facteurs extérieurs encore inconnus.

Dans les années vingt de notre siècle, les physiciens étaient persuadés que l'ionisation de l'air, qui provoquait l'écoulement des charges des électroscopes, était d'origine extraterrestre. Millikan fut le premier à émettre cette hypothèse et c'est lui qui inventa le terme de rayonnement cosmique.

En 1927, le physicien soviétique D. V. Skobeltsyne photographia pour la première fois les traces laissées par le passage des rayons cosmiques dans une chambre d'ionisation.

A l'aide des procédés usuels, décrits dans ce qui précède, on mesura l'énergie des rayons cosmiques et on constata qu'elle était énorme.

Lors de l'étude de la nature des rayons cosmiques, les physiciens firent plusieurs découvertes. C'est à l'occasion de ces études que fut

prouvée l'existence du positon et c'est dans les rayons cosmiques qu'on décela pour la première fois les mésons, qui sont des particules ayant une masse intermédiaire entre celles de l'électron et du proton.

L'étude des rayons cosmiques est une des activités les plus passionnantes auxquelles se livrent les physiciens.

* * *

Il est difficile d'exposer les questions que traite une discipline en plein essor comme l'est l'astrophysique, dans un petit livre qui a pour objet d'exposer les grandes lignes de la Physique. De toutes les questions concernant l'Univers, nous n'avons retenu que celles qui nous semblaient particulièrement intéressantes.

Tableau des particules élémentaires *)

	Particule	Symbole **)	Masse		Durée de vie, s	Spin, $\hbar$	Charges			Etrangeté, S	Principal processus de transmutation
			MeV	m_e			Electrique, e	Leptonique	Baryonique		
Leptons	Photon	γ	0	0	∞	1	0	0	0		
	Neutrino	$\nu\tilde{\nu}$	0	0	∞	1/2	0	+1	0		
	Electron	e^-e^+	0,511	1	∞	1/2	—1	+1	0		
	Muon	$\mu^-\mu^+$	105,66	206,77	$2,1 \cdot 10^{-6}$	1/2	—1	+1	0		$\mu^- \to e^- + \nu_\mu + \tilde{\nu}_e$
Mésons	Mésons π	$\pi^+\pi^-$	139,6	273,5	$2,55 \cdot 10^{-8}$	0	+1	0	0	0	$n^+ \to \mu^+ + \nu_\mu$
		π^0	135,0	264,2	$2 \cdot 10^{-16}$	0	0	0	0	0	$\pi^0 \to 2\gamma$
	Mésons K	K^+K^-	493,8	966,3	$1,23 \cdot 10^{-8}$	0	+1	0	0	+1	$K^+ \to \mu^+ + \nu_\mu$
		$K^0\tilde{K}^0$	498,0	974,5	$K_1^0 1 \cdot 10^{-10}$	0	0	0	0	+1	$K_1^0 \to 2\pi$
					$K_2^0 6 \cdot 10^{-8}$						$K_2^0 \to 3\pi$
Baryons	Proton	$p\tilde{p}$	938,26	1836,1	∞	1/2	+1	0	+1	0	
	Neutron	$n\tilde{n}$	939,55	1838,6	$1 \cdot 10^3$	1/2	0	0	+1	0	$n \to p + e^- + \tilde{\nu}_e$

Suite

	Particule	Symbole **)	Masse		Durée de vie, s	Charges					Principal processus de transmutation
			MeV	m_e		Spin, $\hbar$	Electrique, e	Leptonique	Baryonique	Etrangeté, S	
Baryons	Hypéron Λ	$\Lambda^0\tilde{\Lambda}^0$	1115,4	2182,8	$2,6\cdot10^{-10}$	1/2	0	0	+1	−1	$\Lambda^0 \to p+\pi^-$
	Hypéron Σ	$\Sigma^+\tilde{\Sigma}^-$	1189,4	2328	$0,8\cdot10^{-10}$	1/2	+1	0	+1	−1	$\Sigma^+ \to n+\pi^+$
		$\Sigma^-\tilde{\Sigma}^+$	1197	2342	$1,6\cdot10^{-10}$	1/2	−1	0	+1	−1	$\Sigma^- \to n+\pi^-$
		$\Sigma^0\tilde{\Sigma}^0$	1192	2333	$< 10^{-14}$	1/2	0	0	+1	−1	$\Sigma^0 \to \Lambda^0+\gamma$
	Hypéron Ξ	$\Xi^-\Xi^+$	1321	2585	$1,7\cdot10^{-10}$	1/2	−1	0	+1	−2	$\Xi^- \to \Lambda^0+\pi^-$
		$\Xi^0\tilde{\Xi}^0$	1314	2572	$3\cdot10^{-10}$	1/2	0	0	+1	−2	$\Xi^0 \to \Lambda^0+\pi^0$
	Hypéron Ω	$\Omega^-\tilde{\Omega}^+$	1675	3278	$\sim 10^{-10}$	3/2	−1	0	+1	−3	$\Omega \to \Xi+\pi,\ \Lambda^0+K^-$

*) Les antiparticules ont les mêmes masses, durées de vie et spins que les particules, mais des valeurs de signe contraire des charges électrique, leptonique et baryonique.

**) A droite sont indiqués les symboles des antiparticules correspondantes.

TABLE DES MATIÈRES